



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PÍSTU DISKOVÉ BRZDY OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM

BULK FORMING TECHNOLOGY OF PISTON OF DISK BRAKE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. SVATOPLUK TOMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Toman Svatopluk, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením

v anglickém jazyce:

Bulk forming technology of piston of disk brake

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie velkosériové výroby pístu diskové brzdy osobního automobilu z konstrukční oceli 12010.3 objemovým tvářením za studena s důrazem na zpětné protlačování.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte literární studii se zaměřením na objemové tvářením za studena
2. Zhodnoťte současný stav výroby součástí obdobného tvaru
3. Navrhnete vlastní technologii výroby se zaměřením na varianty a jejich hodnocení
4. Vypracujte výkresovou dokumentaci postupového nástroje
5. Zpracujte technické a ekonomické hodnocení
6. Formulujte závěry a doporučení

Seznam odborné literatury:

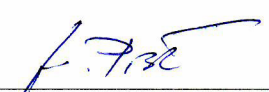
1. LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
2. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. BABOR, Karel, CVILINEK, Augustin, FIALA, Jan. Objemové tváření ocelí. Vladimír Hašek; Eva Tamelová. 1. vyd. Praha : SNTL, 1967. 332 s. Strojírenská literatura; sv. 6006.
4. ELFMARK, Jiří, et al. Tváření kovů. Ing. Pavel Vávra. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-03-00651-1.


Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 1.11.2007



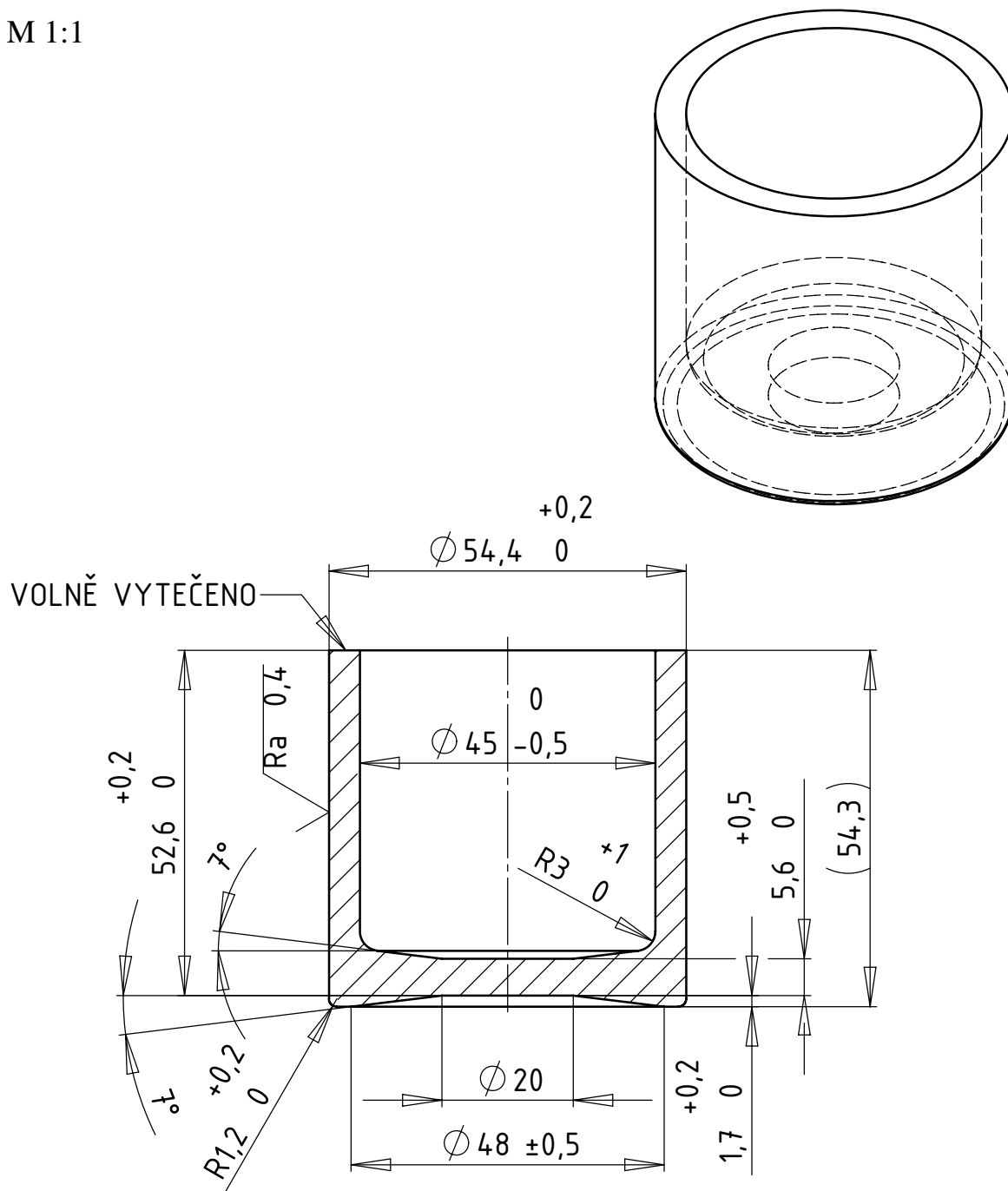

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Výkres zadané součásti:

$\sqrt{Ra\ 6,4\ (\checkmark)}$

M 1:1



ABSTRAKT

TOMAN Svatopluk: Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením

Projekt diplomové práce vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru 23-03-T002 předkládá návrh technologie výroby polotovaru pístu diskové brzdy osobního automobilu z uhlíkové oceli 12 010.3. Předpokládaná roční výrobní série je 300 000 ks. S využitím poznatků z literární studie problematiky objemového tváření kovů za studena byly navrženy tři varianty postupu výroby. Vybraná varianta, pro kterou byly provedeny technologické a energetické výpočty, se skládá ze dvou tvářecích operací. K realizaci výroby součásti byl zvolen třípostupový tvářecí automat TPD 630 (výrobce Šmeral Brno) s nominální tvářecí silou 6 300 kN. Materiálem průtlačníku zvolena NO 19 571, v případě průtlačnice rychlořezná ocel 19 830 a objímka je vyrobena z oceli 19 733. Tepelné zpracování nástrojů voleno podle doporučených hodnot. Optimalizace rozměrů nástroje proběhla na PC.

Klíčová slova: objemové tváření, zpětné protlačování, píst, disková brzda, ocel ČSN 41 2010

ABSTRACT

TOMAN Svatopluk: Bulk forming technology of piston of disk brake

The project of Master's thesis elaborated within engineering studies of branch 23-03-T002 proposes a technology of production of disk brake piston made of low-carbon steel EN C10E. Supposed production amount is 300 000 pieces per year. With knowledge of literary study on the theme of cold steel bulk forming, three variants of production technique were proposed. The chosen one, for which the technological and energy computations were accomplished, consists of two basic forming operations. For manufacture realization was selected three-stage automatic forming machine TPD 630 (manufacturer Šmeral Brno) with nominal forming output of 6 300 kN. As a material of extruding punch, tool-steel EN X100CrMoV5-1 was chosen. For extruding dies was selected high speed steel HS 6-5-2 and its shrink ring is made of high quality steel 60WCrV8. Optimalization of tool properties was performed with specialized PC software.

Keywords: bulk forming, backward extrusion, disk brake, piston, steel EN C10E

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

TOMAN Svatopluk: *Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením*. Brno, 2008. 74 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 23. května 2008



.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování této diplomové práce.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

1. ÚVOD.....	10
2. POPIS A FUNKCE ZADANÉ SOUČÁSTI	11
2.1 Funkce pístu v brzdovém systému osobního automobilu	11
2.2 Charakteristika zadané součásti.....	13
3. PROBLEMATIKA OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ KOVŮ ZA STUDENA.....	14
3.1 Úvod do problematiky OTS	14
3.2 Plastická deformace kovů.....	15
3.2.1 Mechanismy plastické deformace	16
3.2.2 Plastická deformace monokrystalu a polykrystalu	17
3.2.3 Důsledky plastické deformace	19
3.2.4 Rekrytalizace a zotavení	20
3.3 Definice objemového tváření za studena.....	22
3.4 Metody OTS, tvarové skupiny dílců	23
3.4.1 Pěchování	23
3.4.2 Protlačování.....	24
3.4.3 Tvarové skupiny dílců.....	27
3.5 Technologičnost výroby při OTS	29
3.6 Základní technologické výpočty	32
3.7 Výpočet odporů a sil při tváření za studena	34
3.7.1 Přetvárné odpory ve tváření, tvářecí síla, práce a výkon	34
3.7.2 Výpočtové modely řešení zpětného protlačování	37
3.8 Materiály pro objemové tváření za studena, příprava polotovarů.....	39
3.8.1 Oceli pro OTS	39
3.8.2 Příprava polotovaru pro tváření za studena, mazání ve tváření	40
3.9 Nástroje pro objemové tváření za studena	41
3.9.1 Materiály nástrojů	41
3.9.2 Konstrukční provedení nástrojů	43
3.9.3 Zděrování průtláčnic	44
3.9.4 Příklad nástroje pro zpětné protlačování	45
3.10 Přehled strojů pro OTS.....	45
4. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ VÝROBY	47
4.1 Technologičnost zadané součásti	48

5. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ZADANÉ SOUČÁSTI.....	49
5.1 Výchozí technologické výpočty	49
5.2 Návrh variant řešení	51
5.3 Zhodnocení návrhů a výběr nejvhodnější varianty	57
5.4 Výpočet potřebné síly a práce	58
6. NÁVRH SESTAVY POSTUPOVÉHO NÁSTROJE	60
6.1 Návrh postupového stroje	60
6.2 Návrh postupového nástroje	60
6.2.1 Průtlačnice a objímka	61
6.2.2 Průtlačník	62
7. VÝPOČTOVÁ SIMULACE POMOCÍ PROGRAMU FORMFEM	63
8. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	65
8.1 Technické hodnocení navrženého postupu.....	65
8.2 Ekonomický přínos.....	65
9. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	69
Seznam použité literatury	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	

1. ÚVOD

Technologie výroby strojních dílů objemovým tvářením za studena se v průmyslové produkci kvůli stoupajícím požadavkům na hospodárnost, rozměrovou přesnost, mechanické vlastnosti a jakost povrchu stala velmi perspektivním a hojně využívaným procesem zejména ve velkosériové a hromadné výrobě. Objemovým tvářením za studena lze vhodně zvoleným postupem a procesními podmínkami výroby nahradit technologii obrábění u velké části symetrických výrobků a výrazně tak zkrátit výrobní čas při dosažení nesrovnatelně lepších pevnostních vlastností výlisku. Součásti zhotovené touto technologií splňují přísné požadavky k použití v širokém okruhu aplikací pro automobilní, leteckou a jinou dopravní techniku, ale také ve stavební konstrukci. Výhodou je zpracování dostupných, nízkouhlíkových ocelí o relativně nízké pevnosti, které v průběhu výrobního procesu vlivem zpevnění a nepřerušného průběhu vláken získávají vynikající výsledné mechanické parametry.

Výše uvedené výhody objemového tvářením ocelí za studena ve spojení s mnohými kombinacemi tvarů, kterých lze lisováním docílit, vedou k neustávajícímu rozšiřování této technologie v průmyslové výrobě strojních součástí.

Diplomová práce „Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením“ je závěrečnou vysokoškolskou kvalifikační prací v rámci mého magisterského studia na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

Hlavním cílem práce bylo s pomocí získaných teoretických znalostí z průběhu studia navrhnout optimální technologický postup velkosériové výroby brzdového pístu osobního automobilu z oceli 12 010.3 s využitím technologie objemového tvářením za studena. Navržený postup měl maximálně využít hlavní výhody lisování za studena (úspora materiálu, krátký výrobní čas, dobrá jakost povrchu, vynikající mechanické vlastnosti výlisku atd.) a omezit rozsah dokončovacích prací třískovým obráběním.

Obsah diplomové práce lze rozdělit do dvou hlavních tematických okruhů. Teoretická pasáž se zabývá analýzou funkce a provozních podmínek vyráběného dílu. Rovněž jsou vzneseny kvalitativní požadavky na tvarovou přesnost a stálost mechanických vlastností použité oceli v průběhu provozu. V nejrozsáhlejší části teoretické rozpravy jsem se zaměřil na vypracování literární studie s problematikou objemového tvářením za studena. Jsou zde uvedeny nejpoužívanější technologie lisování s příkladem typických tvarů výlisků. Náznorným způsobem s četným využitím grafů a obrázků jsou vystiženy charakteristické vlastnosti ocelí vhodných pro lisování. Dále je uveden postup výpočtu deformačních napětí dle různých přístupů řešení a práce potřebné pro zhotovení požadovaného tvaru. Nechybí přehled konstrukčního provedení funkčních částí postupového nástroje, ale také výčet a rozdělení nejpoužívanějších strojů vhodných pro tvářením za studena.

Vlastní návrh nejvhodnějšího způsobu výroby pístu je řešen v technologické části diplomové práce. V této části je s ohledem na technologičnost výroby dle dostupných podkladů a literatury předloženo k posouzení několik variant zhotovení součástí. Na základě provedených výpočtů a simulací výrobních procesů pomocí dostupných počítačových programů a po zvážení z hlediska pracnosti, kvality výrobků a ekonomických ukazatelů byla zvolena optimální varianta. Pro tuto byla posléze navržena a rozkreslena sestava nástroje včetně vyhotovení výrobních výkresů nejdůležitějších funkčních prvků.

Nedílnou součástí práce je rovněž posouzení ekonomického a technického přínosu navrženého postupu a grafické porovnání hospodárnosti výroby objemovým tvářením za studena s alternativními způsoby výroby pístu.

V závěrečném shrnutí uvádím výsledky dílčích výpočtů zvoleného technologického postupu výroby a své poznatky získané v průběhu zpracování diplomové práce tak, aby je bylo možno efektivně využít v praxi.

2. POPIS A FUNKCE ZADANÉ SOUČÁSTI

2.1 Funkce pístu v brzdovém systému osobního automobilu [9]

Brzdový systém motorových silničních vozidel je jedním z nejdůležitějších prvků ovlivňujících bezpečnost provozu. Brzdný výkon této soustavy při plném zatížení až několikanásobně převyšuje hnací výkon motoru automobilu. V provozu jsou součásti brzd zatěžovány rovněž vysokými teplotami, které na funkčním rozhraní třecích ploch kotouče a brzdového obložení mohou dosahovat až 750°C. Proto jsou na komponenty brzdového systému kladeny nejpřísnější požadavky na kvalitu, materiál, spolehlivost a trvanlivost jednotlivých dílů.

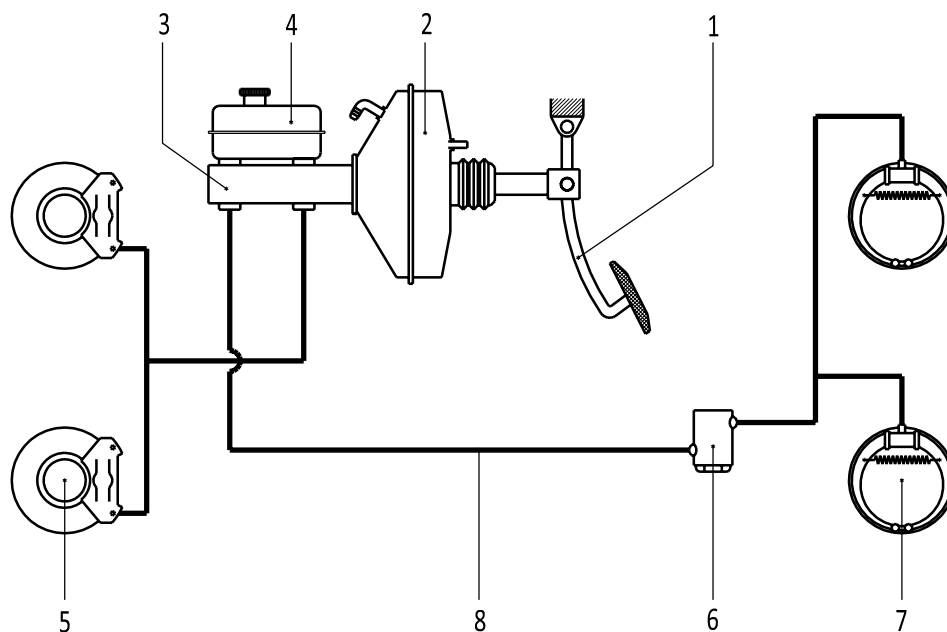
Brzdy používané v automobilovém průmyslu se podle konstrukčního provedení hlavních brzděných prvků dělí na:

- a) bubnové,
- b) diskové (kotoučové).

V současné době je trendem používat na všech kolech osobních automobilů brzdy kotoučové. Mezi jejich hlavní přednosti patří jednoduchá konstrukce, nenáročná údržba, větší bezpečnostní rezerva, vysoká stabilita brzdného účinku při vysokých teplotách a citlivé dávkování brzdné síly, které je důležité zejména pro možnost aplikace elektronických bezpečnostních stabilizačních systémů moderních automobilů.

Princip činnosti kotoučových brzd je založen na přitlačování třecích ploch brzdového obložení na obě strany rotujícího kotouče pevně spojeného s nábojem kola. Vyvození přtlaku brzdových segmentů s třecím obložением je zajišťováno utěsněnými písty uloženými v třmeni brzdy. Na dno pístu působí tlak provozní kapaliny ovládaný sešlápnutím brzdového pedálu a umocněný účinkem podtlakového posilovače.

Kotoučové brzdy se dále dělí dle provedení s pevným nebo plovoucím brzdovým třmenem. U současných osobních automobilů se kvůli rovnoměrnému přtlaku destiček na kotouč preferuje použití brzd s plovoucím třmenem.

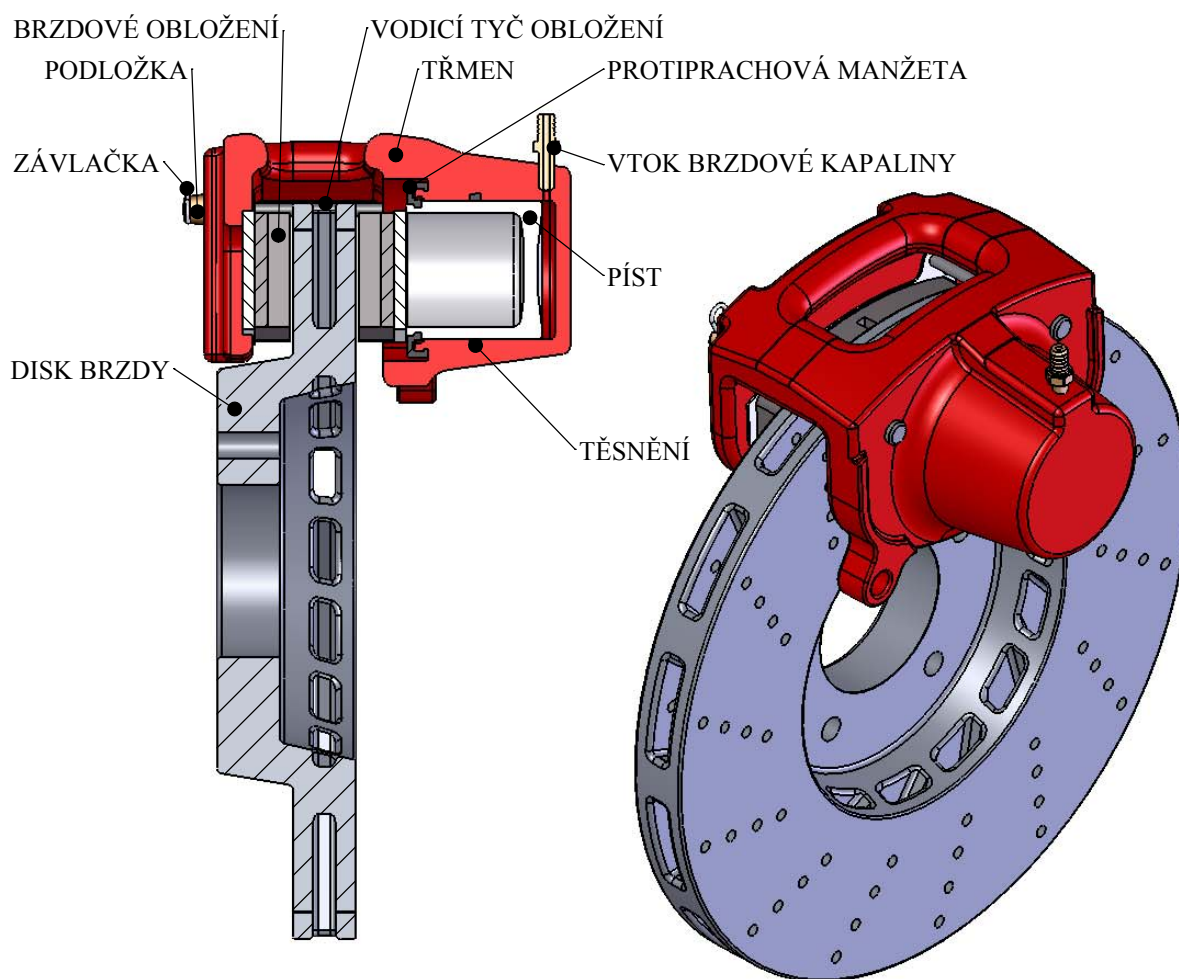


- 1 - brzdový pedál, 2 - podtlakový posilovač, 3 - tandemový hlavní brzdový válec,
4 - nádržka na brzdovou kapalinu, 5 - disková brzda přední nápravy,
6 - omezovač brzdné síly zadní nápravy, 7 - bubnová brzda zadní nápravy,
8 - tlakové vedení brzdové kapaliny

Obr. 2.1 Schéma brzdové soustavy osobního automobilu [9]

Na obr. 2.1 je znázorněno schéma typického uspořádání nejdůležitějších komponent brzdového systému osobního automobilu. Diskové brzdy přední nápravy a bubnové na kolech zadní nápravy jsou přes hlavní tandemový válec rozděleny pro zvýšení bezpečnosti do dvou samostatných okruhů. Do okruhu zadní nápravy je začleněn omezovač brzdné síly pro případy, kdy je zadní náprava nadlehčena vlivem klopného momentu při brzdění. Vedení brzdové kapaliny musí zvládat provozní tlaky v řádech stovek kilopascalů, zároveň mají být odolné proti mechanickému poškození a chemickým vlivům syntetických brzdových kapalin.

Řez diskovou brzdou s plovoucím třmenem a 3D vyobrazení sestavy brzdy na obr. 2.2 umožňuje názornou ukázkou činnosti zpracovávané součásti – pístu. Při plynulé jízdě se disk brzdy přišroubovaný k náboji rotujícího kola volně otáčí. To mu umožňuje vůle mezi činnými plochami třecího obložení, která při správném seřízení činí řádově několik desetin milimetru. Po sešlápnutí brzdového pedálu vzroste tlak v hydraulickém systému, čímž dojde k silovému působení kapaliny na plochu pístu a jeho posunutí směrem k brzdovému disku. Otevřená strana pístu působí plochou mezikruží na pohyblivou brzdovou destičku s obložením o vysokém součiniteli tření. Konstrukce plovoucího třmenu způsobí přitáhnutí protilehlé strany s další destičkou. Oboustranným třením obložení s diskem brzdy dochází k požadovanému efektu zpomalení. Po uvolnění brzdového pedálu se píst vrací do klidové polohy buď působením pružin nebo vhodným navržením tvaru drážky pryžového těsnění pístu. Brzdový třmen je přes vodící člen připevněn napevno k dílům přední nápravy (rejdový čep atd.).



Obr. 2.2 Řez diskovou brzdou a 3D vyobrazení sestavy brzdy

2.2 Charakteristika zadané součásti

Výlisek, jehož postup výroby je zpracováván v diplomové práci, slouží jako polotovár pro výrobu komponentu kotoučové brzdy osobního automobilu. Dohotovení polotovaru do finálního tvaru a rozměrů je uskutečněno třískovým obráběním na soustružnickém CNC automatu. Rozsah dokončovacích prací představuje:

- 1) přesoustružení čela pístu (plocha mezikruží) na požadovanou výšku,
- 2) zhotovení drážky pro usazení pryžové protiprachové manžety.

Ostatní funkční plochy (válcová plocha pístu a vnější strana dna) už není třeba dále opracovat. Drsnost povrchu těchto ploch se pohybuje v okolí hodnoty R_a 0,4 μm , což stačí k plnění požadované funkce při pohybu pístu v těle brzdového třmenu. Rozměrová a geometrická přesnost i jakost povrchu vnějšího průměru pístu je dána kvalitou zpracování průtlačnice, trvanlivostí a tuhostí nástroje jako celku.

Píst je vyráběn z uhlíkové oceli 12 010, žíhané na měkko (přibližný ekvivalent oceli TRISTAL), která je zvláště vhodná pro lisování za studena. Doporučeným chemicko-tepelným zpracováním pro tuto ocel je cementování. Po kalení vykazuje materiál nižší pevnost v jádře. Je zaručeně svařitelná.

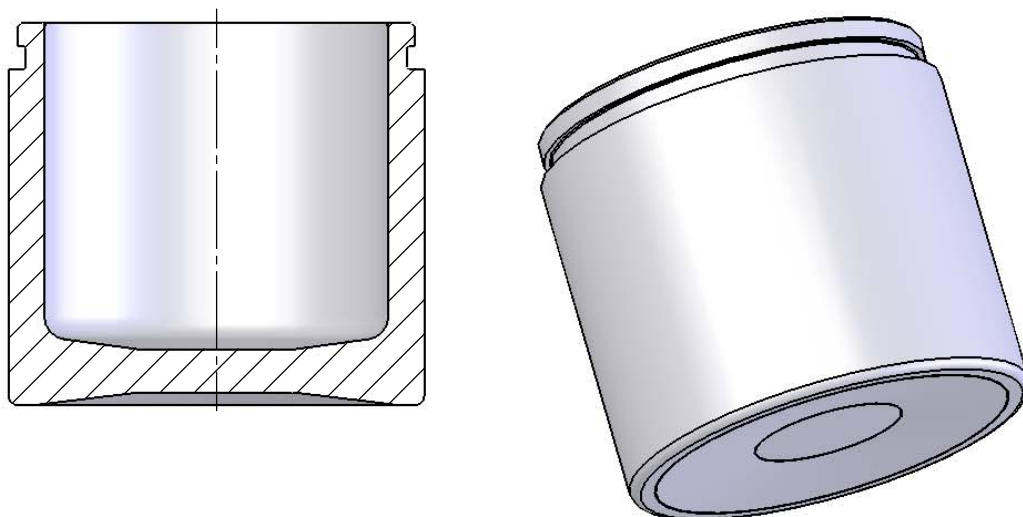
Výchozí parametry pevnosti a houževnatosti oceli 12 010.3:

$R_m = 405 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 245 \text{ MPa}$, $A_{10} = \sim 25 \%$, $Z = 70 \%$. Zjednodušeně řečeno, použitá ocel je měkká a velmi dobře tvařitelná.

Některé zahraniční ekvivalentní materiály: ASTM 1010, EN C10E, DIN C10, DIN Ck10, EN 1.1121.

Tab. 2.1 Chemické složení oceli [hm. %] dle [11]

Materiál	Fe	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
ČSN 41 2010 min	zbyt.	0,07	0,15	0,30	0,35	0,30	0,040	0,040	0,40
max		0,14			0,65				



Obr. 2.3 Konečná podoba pístu po dokončení třískovým obráběním

3. PROBLEMATIKA OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ KOVŮ ZA STUDENA

3.1 Úvod do problematiky OTS [4], [7], [10]

Kovové materiály a jejich slitiny jsou charakteristické pravidelným uspořádáním atomů, tzv. krystalovou strukturou. To je způsobeno vazebními silami (vazbami), které shromažďují jednotlivé atomy do útvarů splňujících určité geometrické a energetické podmínky. Mezi ty patří princip nejmenšího objemu, princip největší symetrie a princip nejkratších spojnic. Vazby jsou realizovány elektrickými silami mezi elektrony a jádry atomů. Nejčastěji rozeznáváme vazby:

- | | |
|---|--------------------|
| a) kovalentní (např. molekula vodíku H_2), | } primární vazby |
| b) iontová (např. molekula $NaCl$), | |
| c) kovová (tzv. elektronový mrak), | |
| d) Van der Waalsova atd. | } sekundární vazby |

U kovů a jejich slitin se uplatňuje vazba kovová. Ta je charakterizována velkým stěsnáním atomů v prostoru. Je tedy velmi jednoduchá a prostorově úsporná.

Atomy kovů mohou krystalizovat ve třech formách uspořádání – krystalových mřížkách:

- 1) kubická prostorově středěná „BCC“ (z angličtiny *body-centered-cubic*),
- 2) kubická plošně středěná „FCC“ (*face-centered-cubic*),
- 3) hexagonální těsně uspořádaná „HCP“ (*hexagonal-close-packed*).

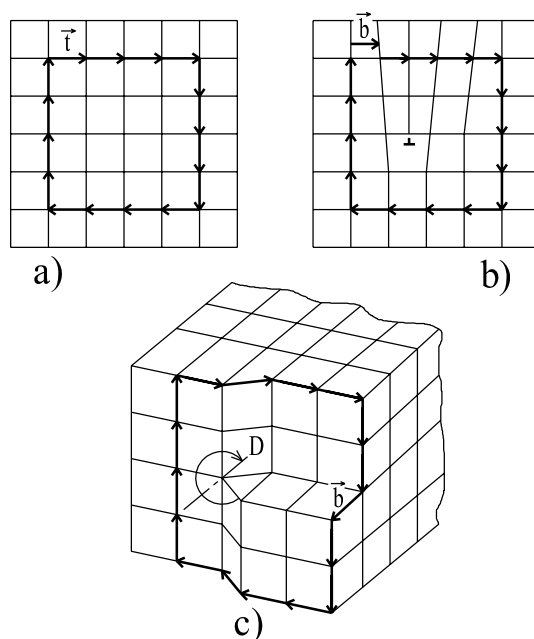
Tyto mřížky představují ideální stav (obr. 3.1a). V mřížkách skutečných materiálů se ale vyskytuje velké množství vad, které narušují pravidelnost uspořádání atomů v mřížce, například vychýlením atomů ze své výchozí polohy s minimální potenciální energií. To se projevuje zvýšením napětí v mřížce, což vede k distorzní deformaci mřížky. Poruchy mřížky významně ovlivňují mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů.

Z hlediska počtu geometrických rozměrů se poruchy mřížky dělí na:

- a) bodové – bezrozměrné (vakance, intersticiály, intersticiální příměsi, substituční příměsi),
- b) čarové – jednorozměrné – tzv. dislokace (hranové, šroubové, smíšené),
- c) plošné – dvourozměrné (hranice zrn malouhlové/velkouhlové, vrstevné chyby),
- d) prostorové (vměstky, dutiny).

Při tváření kovů dochází k plastické deformaci, kterou umožňuje zejména přítomnost čarových poruch – dislokací.

Rozeznáváme dislokace *hranové* a *šroubové*. Jejich kombinací vznikají dislokace *smíšené*. Charakter dislokace určuje tzv. Burgersův vektor \vec{b} , který uzavírá myšlenou smyčku translačních vektorů. Tato smyčka je vedena ve dvou směrech v kladném a záporném smyslu krystalem s dislokací. V případě hranové dislokace je vektor \vec{b} kolmý na dislokační čáru (obr. 3.1b), u šroubové je s dislokační čarou rovnoběžný (obr. 3.1c). Leží-li úhel mezi Burgersovým vektorem a dislokační čarou v rozmezí 0° až 90° , jde o smíšenou dislokaci.



Obr. 3.1 Charakteristika dislokací Burgersovým vektorem [7]

Dislokace se v rámci krystalického materiálu mohou pohybovat dvěma způsoby:
 \Rightarrow kluzem – děje se ve skluzové rovině, přičemž u hranové dislokace probíhá ve směru Burgersova vektoru. K uvedení dislokace do pohybu je potřeba určité napětí nazývané třecí, nebo také Peierlsovo-Nabarrovo napětí:

$$\tau_{PN} = G \cdot e^{\frac{-2\pi w}{b}} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

kde: G ... modul pružnosti ve smyku,

w ... délka dislokační čáry,

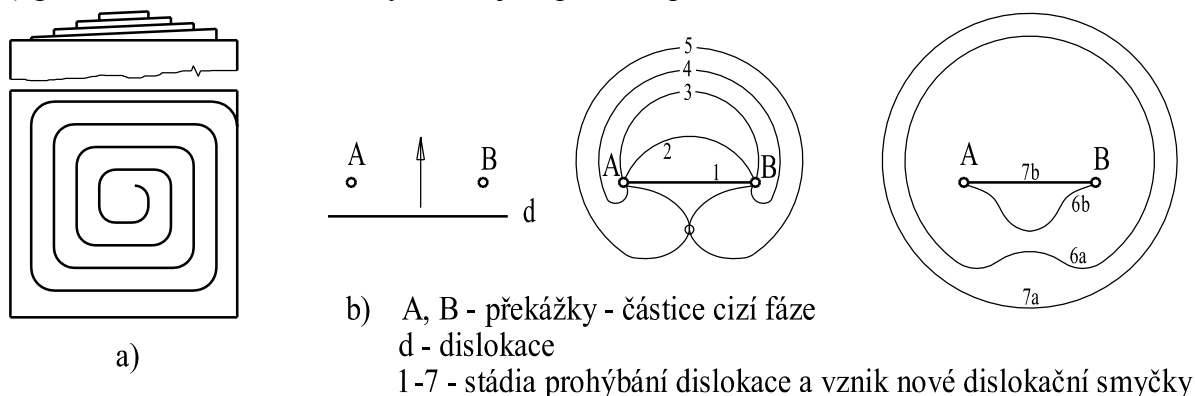
b ... velikost Burgersova vektoru \vec{b} .

Toto třecí napětí je však velmi malé, slouží pouze k překonání odporu mřížky proti postupu dislokace. Rychlost kluzu dislokace se pohybuje až v oblasti rychlosti zvuku 10^3 m.s^{-1} .

\Rightarrow šplháním – difuzní způsob, využívající pohybu bodových poruch (vakancí, intersticiálů). Probíhá skokově. Závisí na pohyblivosti poruch a na teplotě materiálu. Je pomalejší než pohyb kluzem.

Dislokace (a poruchy mřížky obecně) vznikají už v metalurgické fázi přípravy kovů a následně při další technologii zpracování. Dislokace mohou vznikat několika možnými způsoby:

- při krystalizaci kovu – mechanismus tzv. růstové spirály (šroubová dislokace),
- při růstu zrn a spojování subzrn s malouhlovou vzájemnou orientací (hranové dislokace),
- přeměnou shluku vakancí na hranové dislokace,
- generování z Frank-Readových zdrojů v průběhu plastické deformace.

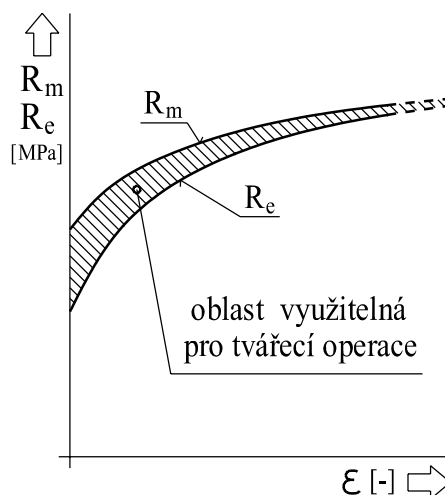


Obr. 3.2 Mechanismy vzniku dislokací: a) růstová spirála [10],
b) činnost Frank-Readova zdroje [7].

3.2 Plastická deformace kovů [7], [10]

Deformací se obecně rozumí změna tvaru kovového tělesa za působení vnějších sil. Rozeznáváme deformaci pružnou – elastickou (vratnou) a plastickou – trvalou. Pro oblast technologie tváření má význam využití plastických vlastností materiálu po překročení meze kluzu až do okamžiku vyčerpání zásoby plasticity (mez pevnosti).

Obr. 3.3 Znázornění oblasti tvářecích operací v diagramu *napětí – deformace*



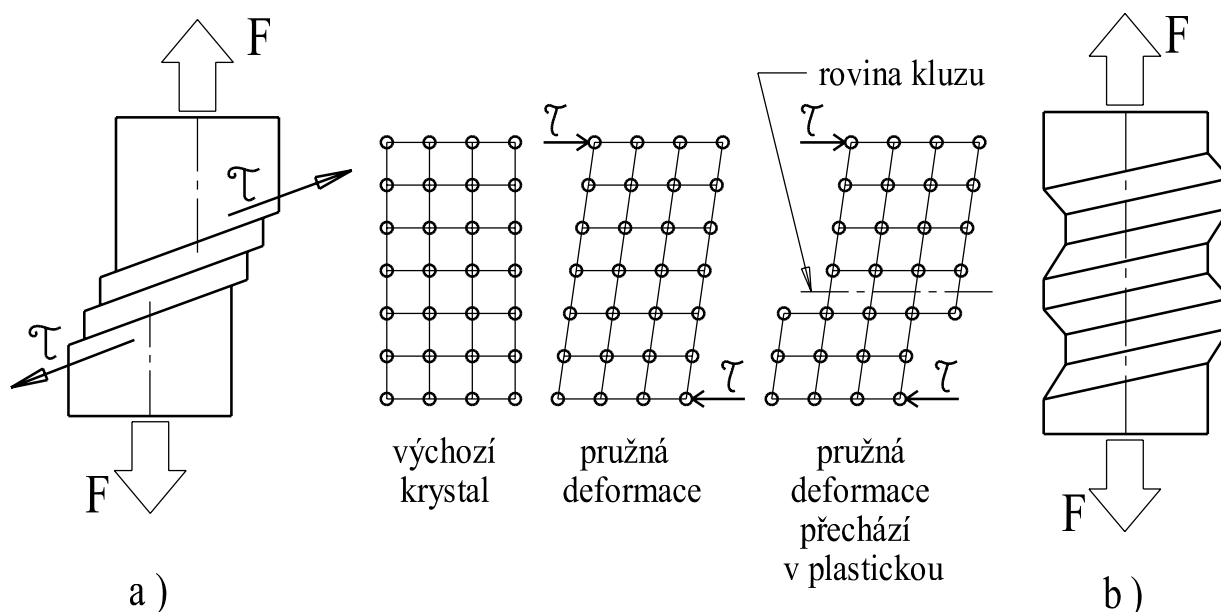
V technologii tváření kovů se v praxi místo pojmu deformace (vhodný zejména pro zkoumání malých rozměrových změn v pružně-plastické oblasti) používá termín *přetvoření*. Cílem tváření za studena je dosáhnout vhodným plastickým přetvořením požadovaného tvaru výlisku bez vzniku trhlin v objemu materiálu. Tyto trhliny mohou v krajním případě vést až k úplné destrukci součásti.

K porušení soudržnosti tělesa (dekohezi vazeb) může dojít namáháním tahovým nebo smykovým napětím. U tahového namáhání se soudržnost porušuje nukleací a rozvojem trhlin, u smykového k tomu dochází skluzem, případně smykovým lomem. K porušení vazeb je zapotřebí oddálit sousední atomy mřížky na dvojnásobnou hodnotu parametru mřížky r_0 . Maximálního teoretického napětí vazeb je dosaženo při vzdálenosti atomů $1,25 r_0$. Toto maximální napětí se označuje σ_{id} – ideální pevnost a dosahuje hodnoty $\sigma_{id} = \frac{E}{8}$. U reálných kovů je hodnota skutečné pevnosti o několik řádů nižší.

3.2.1 Mechanismy plastické deformace

Plastická deformace se děje buď na hranicích nebo uvnitř zrn. Existují dva základní mechanismy rozvoje plastické deformace – kluzem (obr. 3.4a) a dvojčatěním (obr. 3.4b). Vždy se uplatňuje ten mechanismus, k jehož iniciaci je potřeba nižší startovní napětí. Majoritním mechanismem vzniku plastické deformace u reálných kovů je kluz. Z výsledků experimentálních zkoušek na monokrystalech s různou krystalickou stavbou plyne, že kluz se řídí těmito zákonitostmi:

- 1) kluz nastává v rovinách nejhustěji obsazenými atomy,
- 2) směr kluzu je rovněž shodný se směrem nejhustěji obsazeným atomy,
- 3) kluz nastane ve směrech, kde maximální smykové napětí dosáhne kritické hodnoty $\tau_{max} \geq \tau_{krit}$.

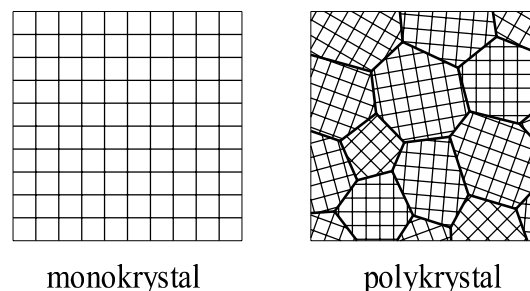


Obr. 3.4 Schémata mechanismů plastické deformace [10]

O tom, jestli bude plastická deformace probíhat kluzem nebo dvojčatěním, rozhoduje také vliv procesních parametrů, zejména teploty a rychlosti přetvoření. Oba mechanismy mohou také působit společně – tím lze dosáhnout velkých přetvoření.

3.2.2 Plastická deformace monokrystalu a polykrystalu

Monokrystalem rozumíme idealizovaný stav, kdy je objem kovu tvořen jedním krystalem s důkladně pravidelným uspořádáním struktury. Reálné kovy mají strukturu polykrystalickou, kterou tvoří shluky zrn s náhodně orientovanou mřížkou. *Polykrystalický* kov vykazuje téměř izotropní mechanické vlastnosti. Pokud chceme dosáhnout výrazně lepších mechanických parametrů v libovolném směru zatěžování, lze vhodnou volbou technologie tváření dosáhnout tzv. textury zrn. Textura zajistí žádanou anizotropii vlastností.



Obr. 3.5 Schémata uspořádání krystalů

Při zatěžování monokrystalu tahovou silou působící v ose jeho plošného průřezu (obr. 3.6) dochází k iniciaci smykového napětí ve skluzové rovině a v určitém směru. Tato rovina a směr jsou dány krystalografickou strukturou. Smykové napětí τ_t ve skluzové rovině způsobuje pohyb dislokací a lze jej stanovit ze závislosti tahového napětí σ a geometrických parametrů skluzové roviny:

$$\tau_t = \sigma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma, \quad (3.2)$$

případně

$$\tau_t = \frac{F_t}{S_\alpha} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{\frac{S_0}{\cos \alpha}} = \frac{F \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{S_0} = \sigma \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (3.3)$$

Nejnižší hodnoty normálového napětí pro vyvolání plastické deformace v monokrystalu je dosaženo, pokud sklon skluzové roviny činí $\alpha = 45^\circ$.

Vztah (3.3) bývá označován jako *Schmidtův* (orientační) *faktor* [7]. Experimentálně bylo zjištěno, že k plastické deformaci monokrystalu kluzem dojde, pokud hodnota smykového napětí τ_t dosáhne určité kritické hodnoty – kritického skluzového napětí τ_{kr} :

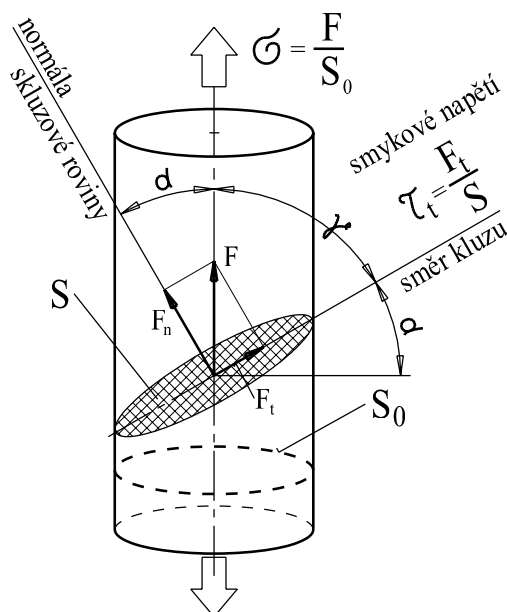
$$\tau_t \geq \tau_{kr}. \quad (3.4)$$

Kritické skluzové napětí τ_{kr} je charakteristika vyjadřující odolnost materiálu vůči plastické deformaci.

Výsledný vztah pro teoretické kritické skluzové napětí pro kubickou mřížku má tvar:

$$\tau_{kr} = \frac{G}{2\pi}. \quad (3.5)$$

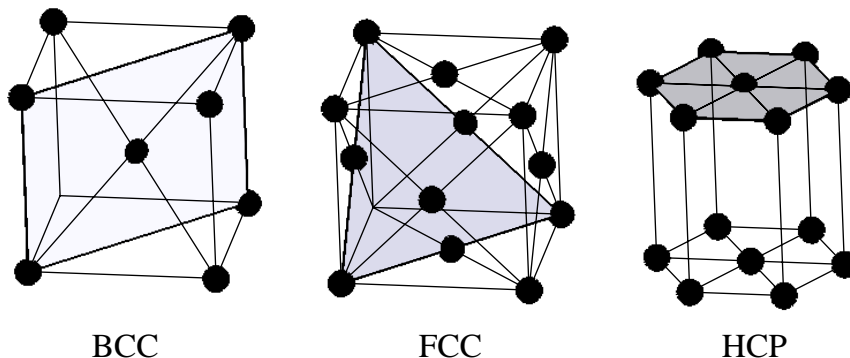
Toto teoretické kritické napětí ale uvažuje posuv celých atomových rovin vůči sobě a je tedy o několik řádů vyšší než skutečné hodnoty získané experimentálně.



Obr. 3.6
Kluzové napětí
v monokrystalu [7]

Tab. 3.1 Přehled faktorů ovlivňujících skluz v krystalových mřížkách kovů

Faktor	BCC kovy	FCC kovy	HCP kovy
kritické skluzové napětí [MPa]	30 ÷ 80	0,3 ÷ 0,8	0,3 ÷ 0,8
počet skluzových systémů	48	12	3
charakteristická vlastnost	pevnost	tvárnost	křehkost

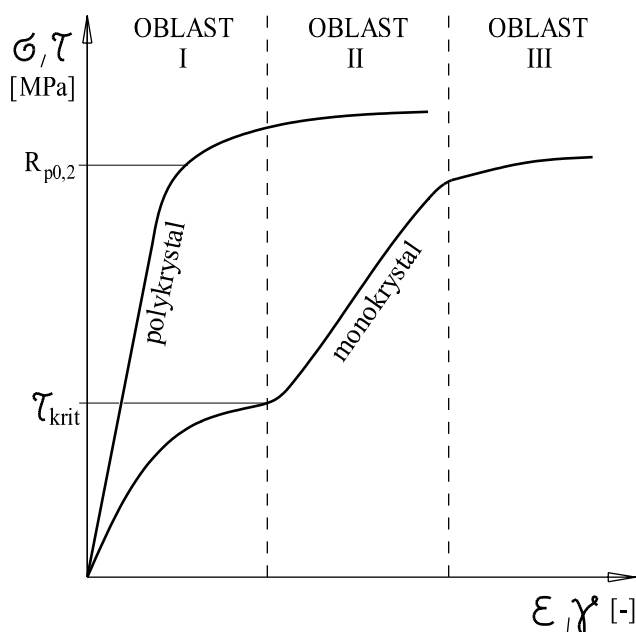


Obr. 3.7 Příklady skluzových rovin v kovových mřížkách [7]

Polykrystalické materiály jsou tvořeny velkým počtem malých krystalků – zrn – s jednotnou mřížkou. Jednotlivá zrna jsou ale vzájemně různě pootočená, takže místa jejich styku tvoří *hranice zrn*. Podmínkou vzniku plastické deformace u polykrystalu je přítomnost pohyblivých dislokací a dostatečného počtu nezávislých skluzových systémů (von Missesova podmínka). K plastické deformaci kluzem dojde nejdříve v zrnech nejvhodněji orientovaných vůči působícímu maximálnímu smykovému napětí. V případě jednoosého namáhání tlakem pod úhlem 45° je hodnota napětí

$$\tau_{max} = \frac{R_e}{2}. \quad (3.6)$$

Následně dojde vlivem spojitosti kontinua k natočení sousedních zrn do polohy vhodné pro kluz. Plastickou deformací se zmenšují rozdíly v orientaci prostorových mřížek zrn a z původního kovu vzniká kov anizotropní, s tzv. deformační texturou. Stupeň anizotropie přímo závisí na velikosti konečného přetvoření.



Křivka zpevnění monokrystalu:

Oblast I – lineární skluz – oblast snadného kluzu (volný pohyb dislokací),

Oblast II – lineární zpevnění – zvyšováním hustoty dislokací materiál výrazně deformačně zpevňuje,

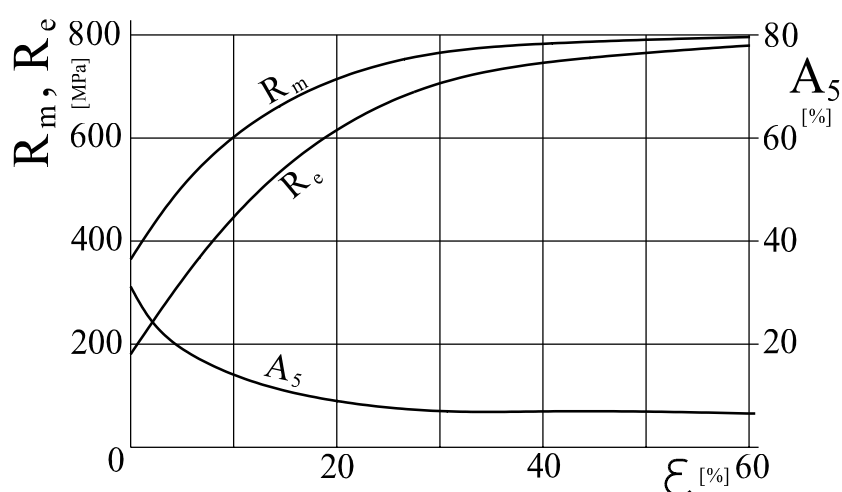
Oblast III – oblast snížení zpevnění v důsledku uplatnění příčného skluzu.

Obr. 3.8

Porovnání tahových diagramů – křivek zpevnění – monokrystalu a polykrystalu [4]

3.2.3 Důsledky plastické deformace [2], [7], [10]

Průvodním jevem makroskopické plastické deformace tvářecích operací za studena je snížení plastičnosti materiálu vlivem omezení pohyblivosti dislokací v rámci krystalické mřížky kovu. Pohyblivost dislokací je omezována překážkami ve struktuře a je úměrně závislá na velikosti skutečného přetvoření. S postupujícím přetvořením se aktivuje stále více zdrojů dislokací (Frank-Readovy zdroje) a tím roste jejich hustota. To způsobí, že se dislokace přiblížené na krátkou vzdálenost začnou odpuzovat a roste potřebné deformační napětí ke změně tvaru. Původně relativně měkké a tvárné kovy se s narůstající velikostí přetvoření stávají tvrdými a pevnými. Tento odpor kovu proti přetvoření se nazývá deformační zpevnění a je výrazný v oblasti teplot zpracování $T \leq 0,3 \cdot T_{tavení}$. V praxi se vhodným rozsahem deformačního zpevnění využívá ke zvýšení pevnostních charakteristik vysoce namáhaných součástí, které by jinak byly zhotoveny konvenčním obráběním. Vhodnou volbou technologie tváření lze dosáhnout zpevnění jak v celém objemu, tak pouze v povrchové vrstvě součástí.



Obr. 3.9 Změna mechanických vlastností nízkouhlíkové oceli 0,1 %C po plastické deformaci za studena (zkouška tahem) [2]

Z diagramu na obr. 3.9 je patrné, že změny mechanických vlastností probíhají zpočátku rychle, ale při větší deformaci již značně pomaleji. Mez kluzu roste rychleji než mez pevnosti, a z důvodu postupného vyčerpávání plasticity se v konečné fázi deformace tyto křivky téměř ztotožňují. Zpevnění je zároveň doprovázeno zvýšením tvrdosti. Deformační schopnosti materiálu, např. tažnost nebo kontrakce, naopak výrazně degradují. To může vést spolu s poklesem houževnatosti k iniciaci trhlin a jiných defektů.

Změnu mechanických vlastností v průběhu elastické a plastické deformace za podmínek jednoosého zatěžování lze vyjádřit pomocí tzv. křivek zpevnění (obr. 3.10). Jsou výsledkem zkoušek materiálu tahovou (tažnost, kontrakce) nebo tlakovou – pěchovací zkouškou. Staví do závislosti skutečná napětí a změnu sledovaného geometrického parametru (např. plocha průřezu vzorku). Rozeznáváme křivky zpevnění:

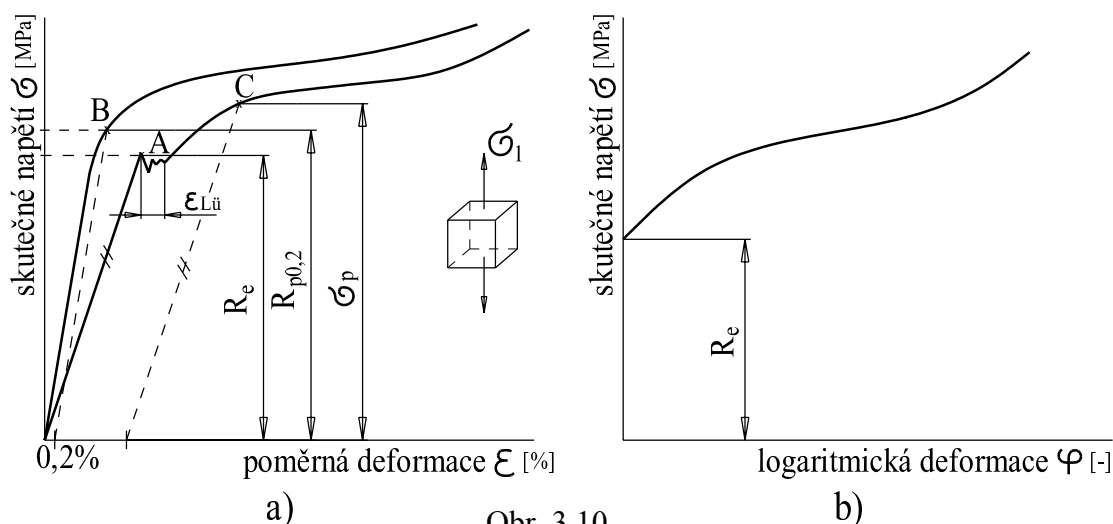
prvního druhu $\sigma(\varepsilon)$ – pro oblast pružně-plastických deformací (obr. 3.10a),

druhého druhu $\sigma(\varphi)$ – pro plastické deformace (obr. 3.10b), přičemž

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} \text{ a } \varphi = \ln \frac{S_0}{S}. \quad (3.7)$$

S_0 a S vyjadřují původní a konečnou plochu průřezu vzorku. Pro rychlé vyjádření stupně deformačního zpevnění materiálu se používá ukazatele plasticity n , tj. hodnoty poměru meze kluzu ku mezi pevnosti

$$n = \frac{R_e}{R_m}. \quad (3.8)$$



Obr. 3.10
a) křivka zpevnění I. druhu pro polykrystalický materiál,
b) křivka zpevnění II. druhu

U kovových materiálů a jejich slitin je okamžik přechodu z elastického chování na plastickou oblast charakterizován mezí kluzu. Ta může být buď výrazná R_e (na křivce zpevnění jasně rozpoznatelná), doprovázená tzv. Lüdersovou deformací (obr. 3.10, bod A) nebo nevýrazná – smluvní $R_{p0,2}$, určená hodnotou trvalé deformace 0,2 % pod zatížením (obr. 3.10, bod B). Po odlehčení vzorku a opětovném zatížení je místo přechodu do plastické oblasti dáno mezí kluzu σ_p – přetvárným odporem (obr. 3.10, bod C). Ten je výrazně závislý na teplotě a rychlosti deformace $\dot{\varphi}$.

Velikost zpevnění záleží jak na velikosti přetvoření průřezu vzorku, tak na použité tvářecí technologii a rovněž na samotném materiálu, konkrétně na chemickém složení a struktuře. Výsledné vlastnosti výlisku je možno ovlivnit volbou výchozího průřezu polotovaru, volbou metody tváření a jakostí materiálu. Pro objemové tváření za studena se požaduje dosažení co největší skutečné deformace bez porušení soudržnosti materiálu. Všeobecně je ocel za studena tím tvárnější, čím méně obsahuje uhlík C a čím má čistější strukturu bez příměsí a vad.

3.2.4 Rekrystalizace a zotavení [3], [7]

Proces zpevnění materiálů zpracovávaných technologiemi plošného a objemového tváření za studena představuje omezení v případě nutnosti vyrábět součásti ve více navazujících operacích. S každým provedeným krokem dochází ke kumulaci přetvoření a tím také k vyčerpávání zásoby plasticity materiálu. Struktura materiálu po několika tvářecích operacích vykazuje značnou texturu zrn. Plastická deformace kovu s takovou strukturou se stává obtížnější a po dosažení mezní plasticity dochází ke vzniku defektů. Pro obnovení původních vlastností (mechanických, fyzikálních) je nutné provést *deformační odpevnění* takového materiálu.

Plastická deformace způsobuje stav termodynamické nerovnováhy v deformovaném materiálu. Při nízkých teplotách je tato nerovnováha schopna se udržet, po zahřátí se vrátí do rovnovážného stavu. Proces deformačního odpevnění lze tedy aktivovat vnesením tepla do materiálu. Rozeznáváme odpevnění:

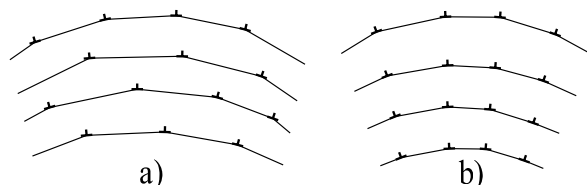
- ▷ statické – aktivováno vnesením „vnějšího“ tepla po tváření,
- ▷ dynamické – probíhá už v průběhu tváření (dynamické zotavení, dyn. rekrystalizace).

Statické odpevnění má podle množství vneseného tepla několik fází:

- 1) zotavení a polygonizaci,
- 2) primární rekrytalizaci a růst zrna,
- 3) sekundární rekrytalizaci.

Zotavení probíhá za teplot $(0,25 \div 0,30) \cdot T_{tavení}$ ve vnitřní struktuře tvářeného kovu. Dochází k zanikání bodových poruch mřížky, uvolňováním a změnou uspořádání a hustoty dislokací. Vnesená energie však není tak velká, aby vznikaly zárodky nových zrn, ale postačuje k zajištění podstatného snížení napětí. Tím se zlepši plastické a současně některé fyzikální vlastnosti materiálu.

Polygonizaci se rozumí uspořádání deformované dislokační sítě šplhem volných dislokací do pravidelného útvaru polygonizační sítě s malouhlovými hranicemi.



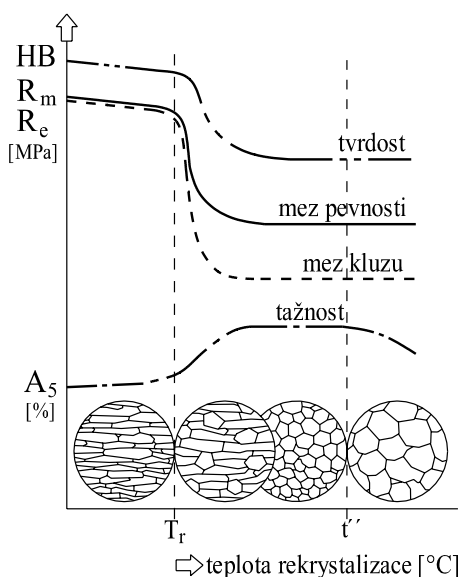
Obr. 3.11

Schéma polygonizace hranových dislokací
a) deformovaný stav, b) zpolygonizovaný stav [7]

Rekrytalizace je proces obnovení plastických vlastností materiálů se zpevněním po tváření na nedeformovanou strukturu původní fáze. Rekrytalizační teplota se pohybuje v rozmezí teplot

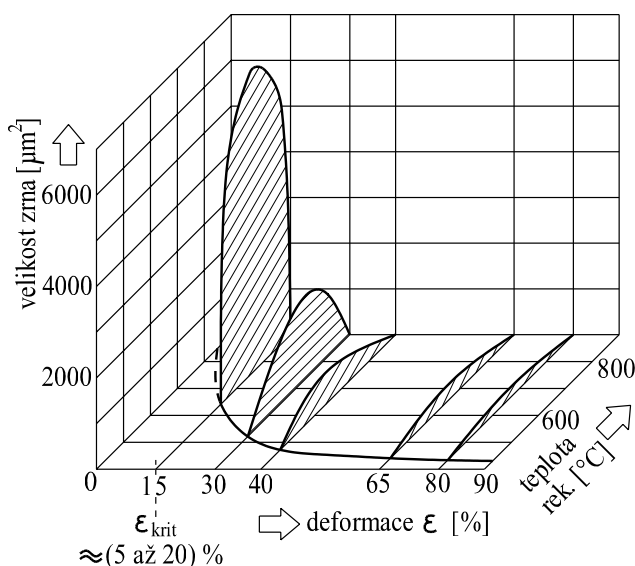
$$T_R = (0,35 \div 0,45) \cdot T_{tavení} \text{ [K]}. \quad (3.9)$$

Jedná se tedy o tepelně aktivovaný děj bez překrytalizace (vždy pod teplotou A_1). Princip **primární rekrytalizace** spočívá ve vytváření zárodků nových zrn se shodnou krystalickou mřížkou původního zrna a růstu těchto nukleací na úkor deformovaného zrna s texturou. Nukleační zárodky vznikají zejména na hranicích a v trojných stycích zrn. Nově vzniklá zrna se od původních liší tvarem i velikostí a dále orientací mřížky. Hustota dislokací po rekrytalizaci odpovídá původní nedeformované matici ($\rho = 10^6 \text{ až } 10^8 \text{ cm}^{-2}$). Změna vlastností a struktury zrna materiálu v průběhu rekrytalizace je znázorněna na obr. 3.12.



Obr. 3.12

Schéma průběhu rekrytalizace, změna vlastností rekrytalizovaného kovu [7]



Obr. 3.13

Rekrytalizační diagram
nizkouglikové oceli [3]

Průběh rekrytalizace závisí na:

- velikosti přetvoření – se zvyšujícím se přetvořením klesá teplota potřebná k rekrytalizaci,
- teplotě rekrytalizace – se zvyšováním teploty roste rychlost rekrytalizace a zmenšuje se potřebný čas k její realizaci,
- chemickém složení a struktuře – vysoká čistota kovu rekrytalizace usnadňuje, hrubší zrna naopak děj brzdí,
- rychlosti deformace.

V praxi se pro stanovení optimálních procesních podmínek používají tzv. rekrytalizační diagramy (obr. 3.13).

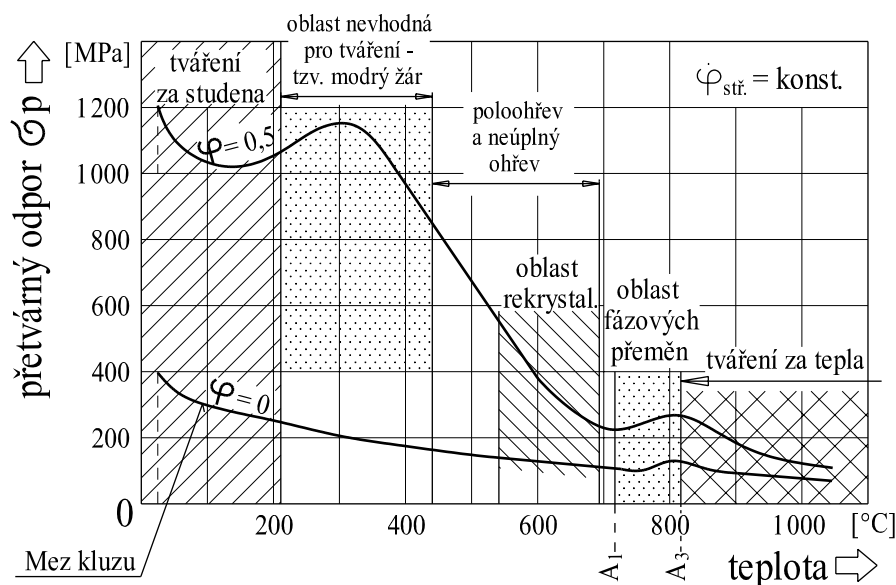
Po překročení určité teploty t'' (obr. 3.12) nebo delší výdrži na rek. teplotě dochází ve struktuře k růstu některých zrn na úkor sousedních nebo ke spojování sousedních zrn. Tento jev se nazývá **sekundární rekrytalizace**. Každý kov je na toto hrubnutí zrna jinak náchylný.

Dynamické odpevnění se uskutečňuje už v průběhu tváření, a to především za zvýšených teplot. Výrazně závisí na rychlosti deformace $\dot{\varphi}$.

3.3 Definice objemového tváření za studena [2], [3], [5], [6]

Objemové tváření za studena je moderní a perspektivní způsob výroby strojních součástí z oceli. Je to vysokoproduktivní metoda využitelná zejména ve velkosériové a hromadné výrobě strojních součástí rozličných tvarů a hmotností. Mezi nejvýznamnější přednosti této technologie se řadí:

- vysoké procento využitelnosti materiálu (dle [6] 87 až 98 %),
- krátký výrobní čas na jednu součást,
- vysoká jakost povrchu výlisku,
- vynikající mechanické vlastnosti výrobku dané zpevněním oceli v průběhu zpracování,
- lze vyrobit součásti mnoha geometrických tvarů a průřezů, symetrické i částečně nesy-metrické, plného průřezu nebo s dutinou atd.,
- polotovarem bývají zejména relativně levné nízkouhlíkové oceli, které procesem zpevnění získají pevnost mnohem dražších ocelí,
- možnost vyrobit součást na více operací a každým technologickým krokem určovat požadované vlastnosti výlisku rozložením zpevnění.



Obr. 3.14 Závislost přetvárného odporu σ_p na teplotě zpracování (příklad oceli 14 140.3) [3]

O tváření za studena hovoříme, pokud teplota zpracování nepřesáhne teplotu rekrytalizace T_R daného materiálu. Z diagramu závislosti přetvárného odporu σ_p na teplotě (obr. 3.14) je ale patrné, že i pod teplotou rekrytalizace se vyskytují pásma se zvýšeným σ_p , takže v praxi tváření za studena se zpracovatelská teplota materiálu pohybuje do hodnoty

$$T \leq 0,3 \cdot T_{tavení} \text{ [K]}. \quad (3.10)$$

Objemové tváření za studena probíhá za působení trojosé – prostorové – napjatosti, především rovnoměrným tlakem. Tím jsou zajištěny podmínky pro vznik velkých trvalých přetvoření v objemu materiálu. Průvodním jevem tváření za studena je vznik deformačně zpevněných povrchových vrstev nebo celého objemu materiálu, což je přínosem z hlediska výsledné pevnosti součásti. Struktura takového kovu je tvořena výraznou deformační texturou zrn. Pokud je technologický postup výroby výlisku složen z několika tvářecích operací a bylo-li dosaženo vyčerpání zásoby plasticity materiálu, je mezi tyto operace vřazen některý z odpevňovacích dějů (rekrytalizační žihání atd.). Zpevnění v požadovaném směru materiálu (hlubokotažné plechy) je možno dosáhnout vhodnou volbou procesních podmínek tváření.

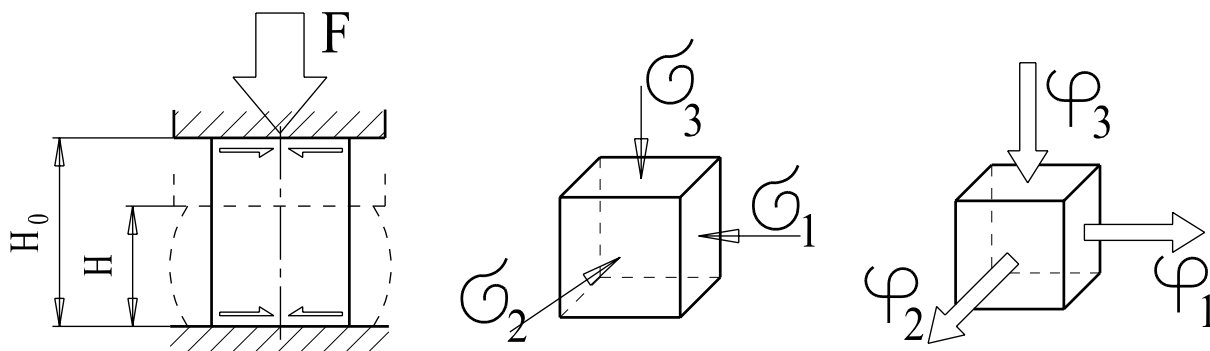
Hmotnost produkovaných výlisků se celosvětově pohybuje v rozmezí několika gramů až do velkých, kolem 20 kg vážících kusů. Dosahovaná přesnost rozměrů a geometrických tolerancí se pohybuje v rozsahu IT8 – IT10. Touto technologií lze u výlisku dosáhnout drsnosti ploch R_a ($0,4 \div 12,5$) μm , přičemž výsledná drsnost ploch výrazně závisí na jakosti a případném opotřebení funkčních částí nástrojů – protlačovadel.

3.4 Metody objemového tváření za studena, tvarové skupiny dílců [1], [2], [6], [10], [17]

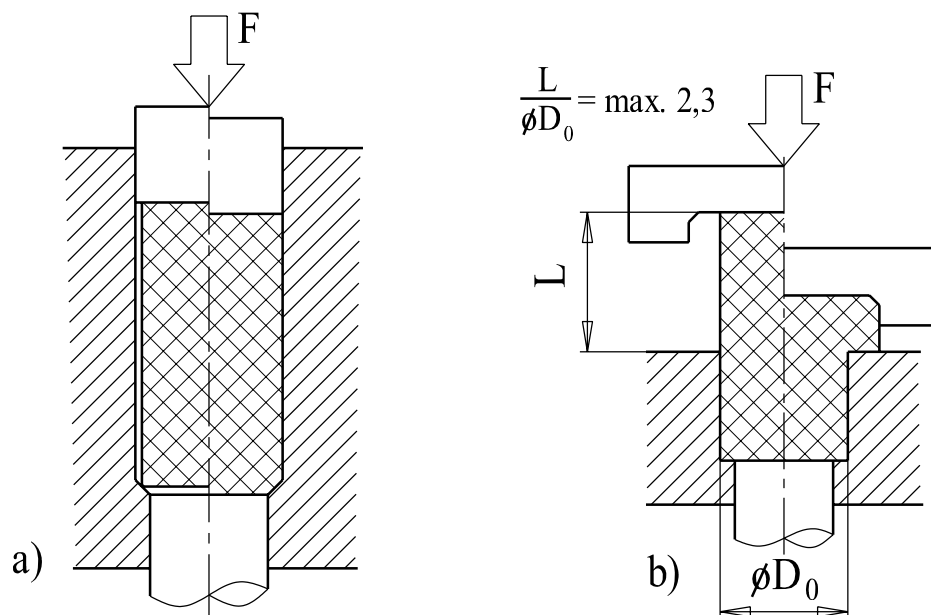
Výroba součástí objemovým tvářením za studena je založena na postupné změně tvaru polotovaru, kde se uplatňují kombinace základních metod tváření: pěchování a protlačování. Mezi metody OTS se řadí také redukování tyčí a drátů, a dále řada doplňkových technologií (vtlačování, ražení, válcování závitů apod.).

3.4.1 Pěchování

Pěchování je základní operací OTS, při němž se snižuje výška a zvětšuje se příčný průřez polotovaru. Pěchování se nejhojněji používá ve výrobě normalizovaných spojovacích součástí nebo jako dílčí operace při víceoperačních postupech. Mechanické schéma pěchování se třením (reálné podmínky) je uvedeno na obr. 3.15. Příklady pěchovacích operací znázorňuje obr. 3.16.



Obr. 3.15 Mechanické schéma pěchování s třením [3]



Obr. 3.16 Příklad operace pěchování:
 a) uzavřené předpěchování – kalibrace průměru a výšky polotovaru,
 b) volné pěchování hlavy čepu.

3.4.2 Protlačování

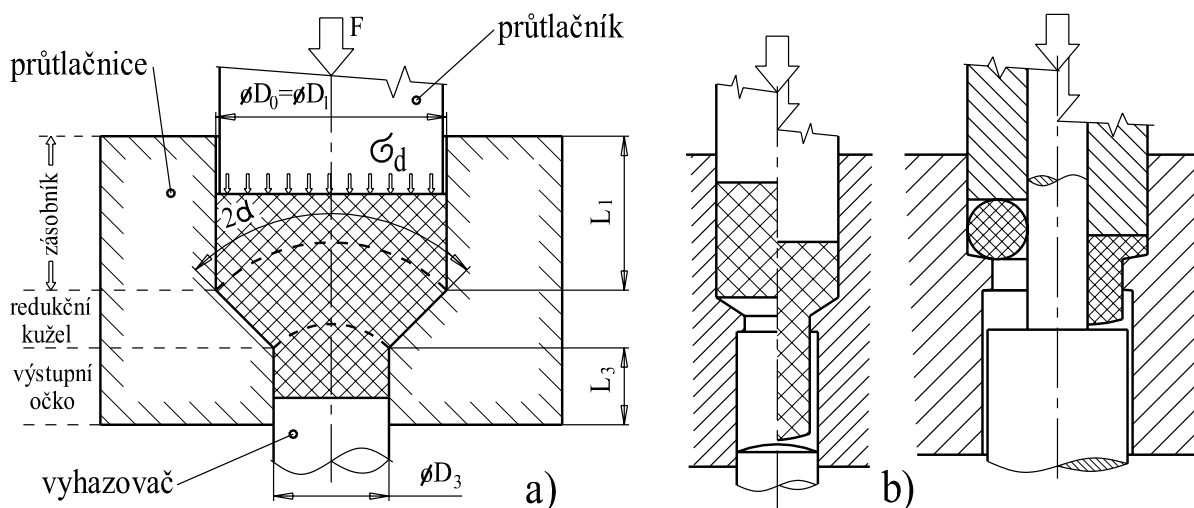
Protlačování je velmi často používanou technologií ve velkosériové a hromadné výrobě spojovacích a štíhlých strojních součástí především symetrického průřezu. Důvodem hojného využití protlačování je ekonomická výhodnost výroby spojená s vynikající jakostí výlisků. Zpravidla malé hmotnosti protlačovaných dílců dovolují zanedbat vliv setrvačných sil a rychlostí přetvoření a analytické řešení provést za statických izotermických podmínek.

Protlačování lze provádět za studena, poloohřevu nebo za tepla. Tato technologie je vhodná ke zhotovení finálních výrobků nebo v hutnictví pro výrobu polotovarů tyčí, trubek nebo drátů. Podle směru toku materiálu, který je u protlačování ve stavu trojosé tlakové napjatosti, rozeznáváme základní způsoby protlačování:

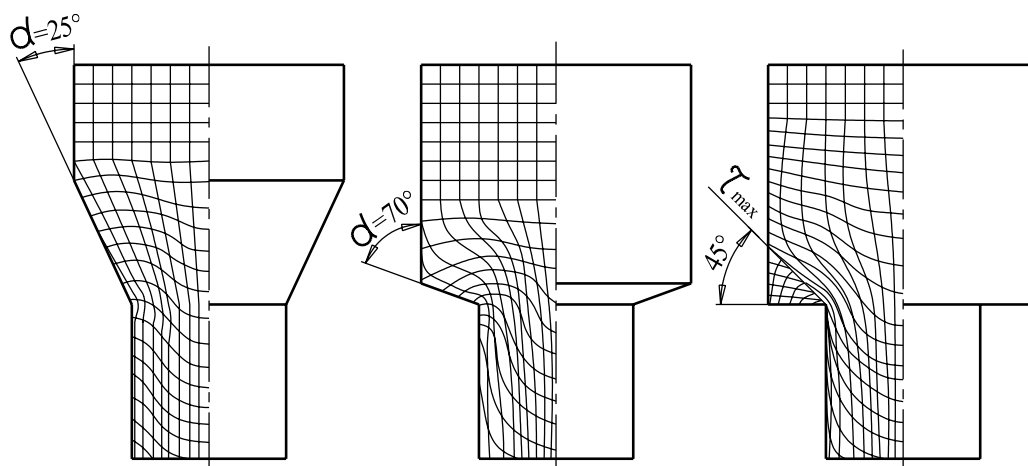
- ➡ dopředné,
- ➡ zpětné,
- ➡ sdružené,
- ➡ stranové a radiální,
- ➡ speciální (vtlačování, protlačování trubek, hydrostatické protlačování).

A) Dopředné protlačování

Při dopředném protlačování se přemísťuje materiál ve směru pohybu průtlačníku. Výchozím polotovarem může být kalíšek, ústřížek drátu, prstenec nebo plný kruhový špalík. Výlisky – protlačky – jsou buď dutá, nebo plná tělesa většinou kruhového průřezu. Mohou mít ale také průřez jiného pravidelného tvaru. Průtlačnice může být řešená s redukčním kuzelem, s redukční částí tvořenou konvexní nebo konkávní křivkou, nebo úplně bez redukční části. Tvar redukční části průtlačnice má vliv na tok materiálu (obr. 3.18) a významně tak ovlivňuje velikost a průběh protlačovací síly.



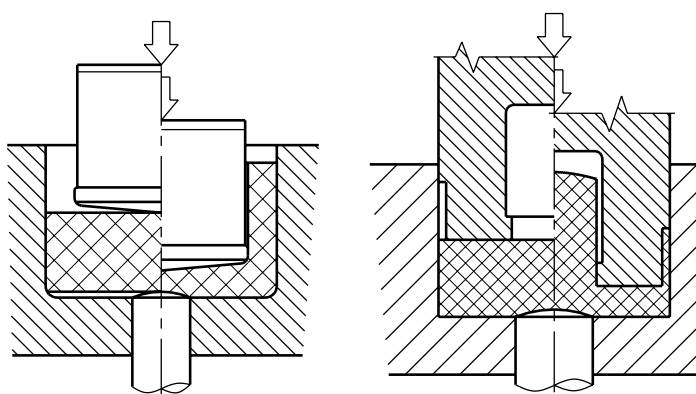
Obr. 3.17 a) geometrický model dopředného protlačování [3], b) příklady dopředného protlačování plného čepu a duté součásti ze stočeného prstence drátu [10]



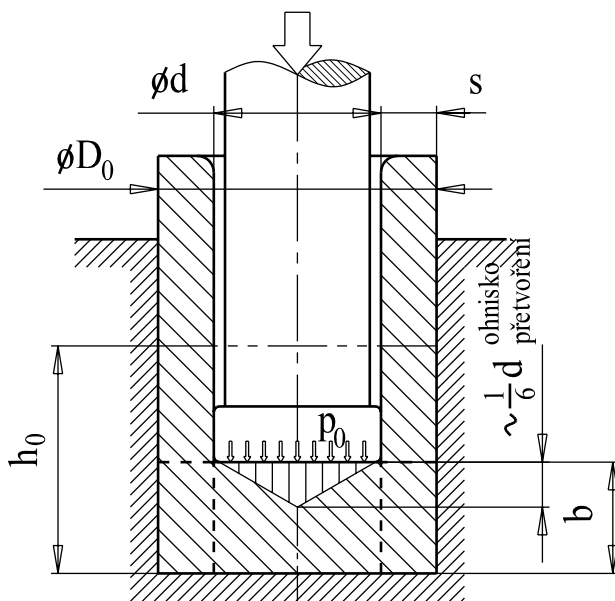
Obr. 3.18 Tok materiálu pro různá provedení redukční části průtlačnice [1]

B) Zpětné protlačování

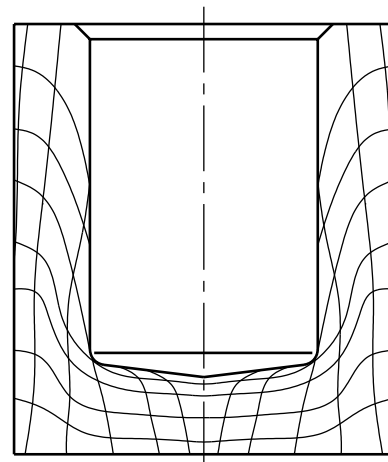
Při zpětném protlačování materiál teče proti směru pohybu průtlačníku. Tímto způsobem se vyrábějí duté součásti s tloušťkou stěny, která je v porovnání s průměrem velmi malá (anebo naopak). Výlisky zpravidla mají tvar kalíšku (pravidelný/nepravidelný průřez), i žebrovaného. Většinou tyto výlisky slouží jako polotovary pro dokončení jinými tvářecími operacemi nebo tržkovým obráběním. Výchozím polotovarem bývá válcový špalík.



Obr. 3.19
Zpětné protlačování kalíšku
a plného tělesa



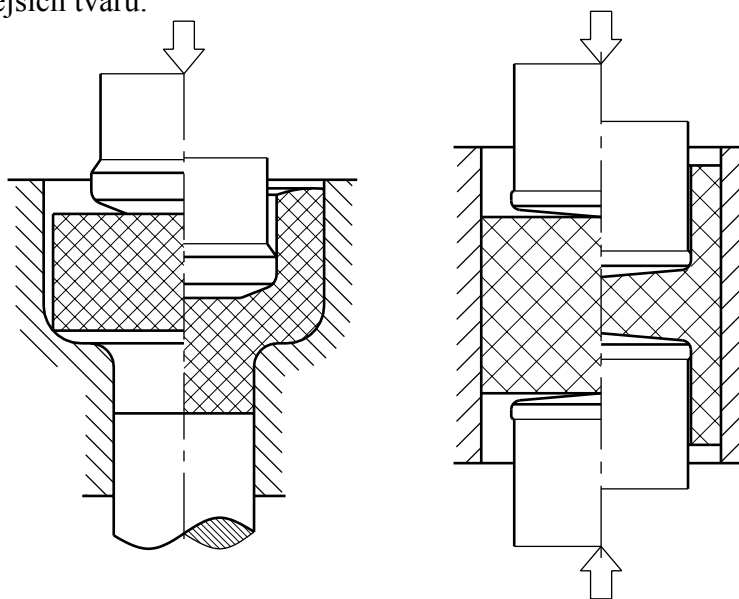
Obr. 3.20 Geometrický model zpětného protlačování [3]



Obr. 3.21
Tok materiálu při zpětném
protlačování kalíšku [17]

C) Sdružené (kombinované, obousměrné) protlačování

Ve sdruženém protlačování se uplatňují oba výše uvedené způsoby protlačování. Materiál působením nástroje teče oběma směry, ale musí být splněna podmínka, že ve spodní části výlisku je dosažený stupeň přetvoření menší, než v jeho horní části. Výchozím polotovarem může být děrovaný rondel, prstenec nebo špalík. S ohledem na požadovanou kvalitu výlisku je vhodné zvážit použití více samostatných operací, které lépe vyhoví při aplikaci u náročnějších tvarů.

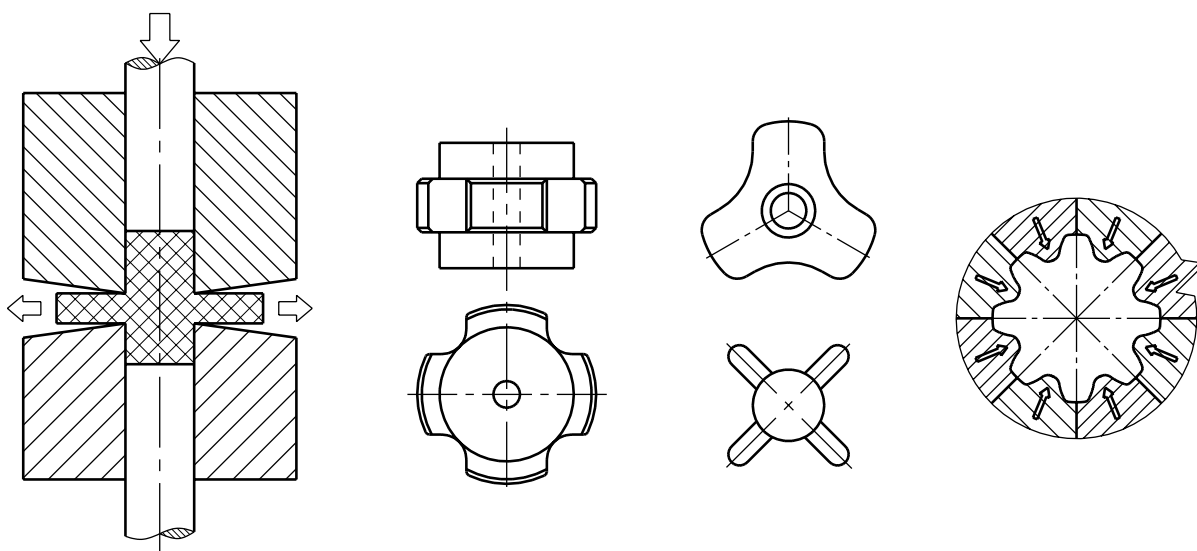


Obr. 3.22 Příklady sdruženého protlačování

D) Stranové a radiální protlačování

Stranový způsob protlačování se od předešlých liší směrem hlavního tečení materiálu, které probíhá v ose kolmé na podélnou osu polotovaru, tedy ve směru radiálním. Tuto metodu lze výhodně využít v případech, kdy je potřeba změnit průřez v určité části vylisku. Výstupky mohou být jak pravidelné s kruhovým průřezem, tak různě nepravidelně tvarované (vačky).

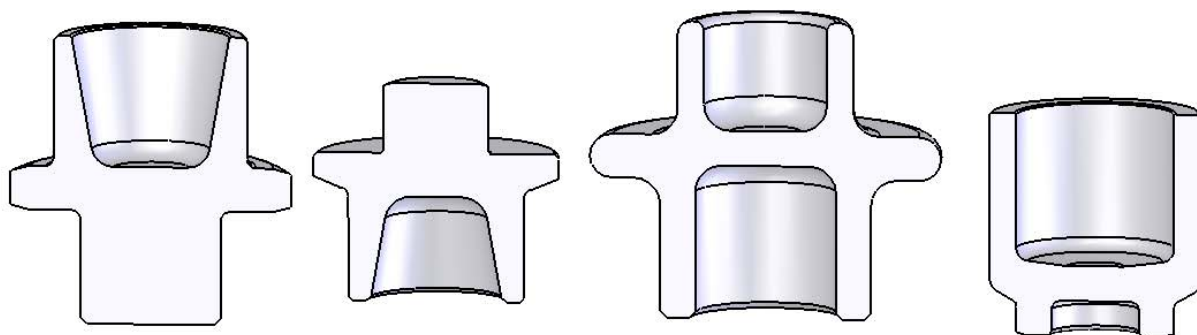
U radiálního tváření dochází ke změně průřezu polotovaru vtlačováním negativně tvarovaných čelistí nástroje dostředným radiálním pohybem k ose vylisku. Využívá se k výrobě drážkových hřídelí, mnohohranů, tvarových ploch atd.



Obr. 3.23 Princip stranového protlačování a radiálního tváření

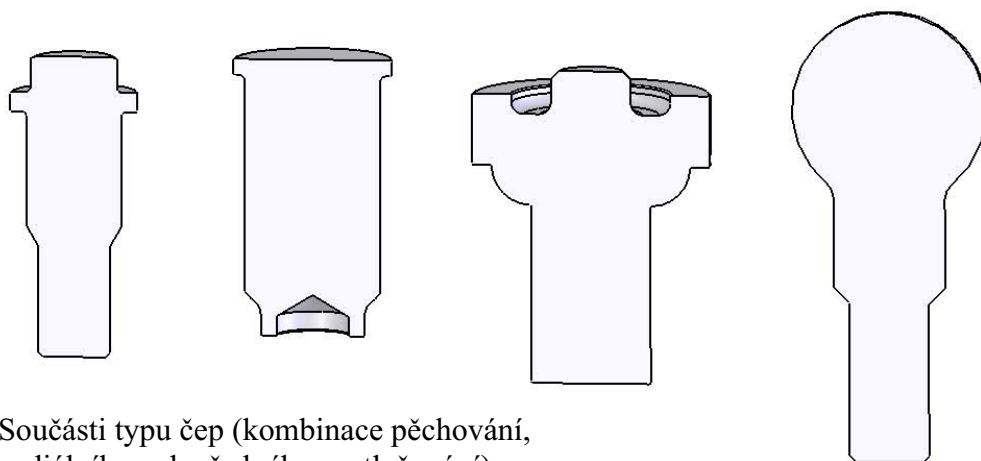
3.4.3 Tvarové skupiny dílců [1], [2], [6]

V praxi velkosériové výroby strojních součástí se požadovaného tvaru vylisku dosahuje vhodnou kombinací výše uvedených základních operací OTS. Návaznost a skladba jednotlivých operací musí zajistit požadované mechanické vlastnosti a jakost vylisku tak, aby mohl spolehlivě plnit zadanou funkci (viz 3.6 Základní technologické výpočty). Charakteristické tvary součástí rozdělené do tvarových skupin jsou uvedeny na obr. 3.24.

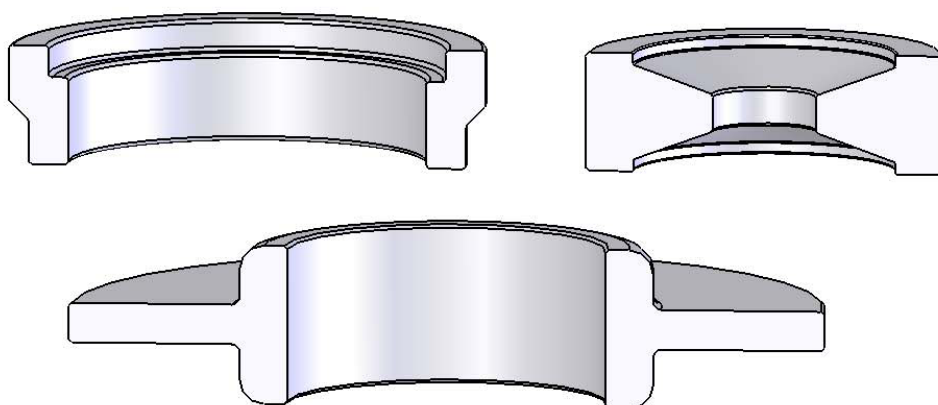


a) Součásti typu kalíšek (kombinace dopředného a zpětného protlačování)

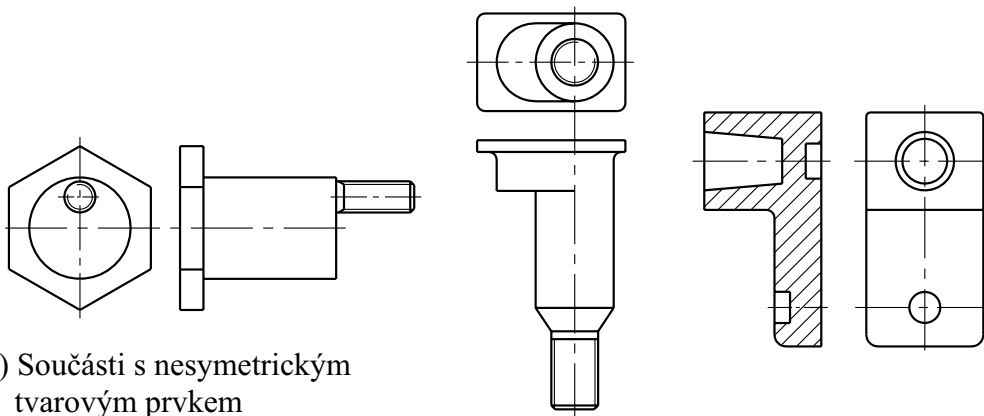
Obr. 3.24 Tvarové skupiny dílců vyráběných objemovým tvářením za studena



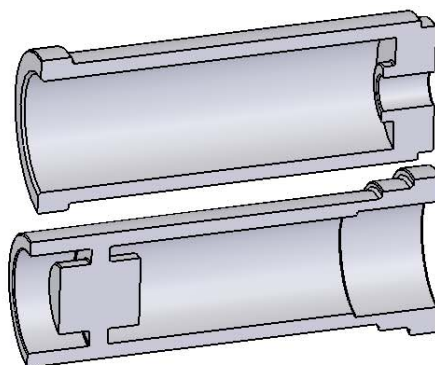
b) Součásti typu čep (kombinace pěchování, radiálního a dopředného protlačování)



c) Ploché, rotačně symetrické součásti s vnitřním otvorem



d) Součásti s nesymetrickým tvarovým prvkem



e) Součásti s dlouhým tělem a vnitřní dutinou (platí $d \ll h$).

Obr. 3.24 Tvarové skupiny dílců vyráběných objemovým tvářením za studena (pokračování)

3.5 Technologičnost výroby při OTS [2], [5], [6], [12], [17]

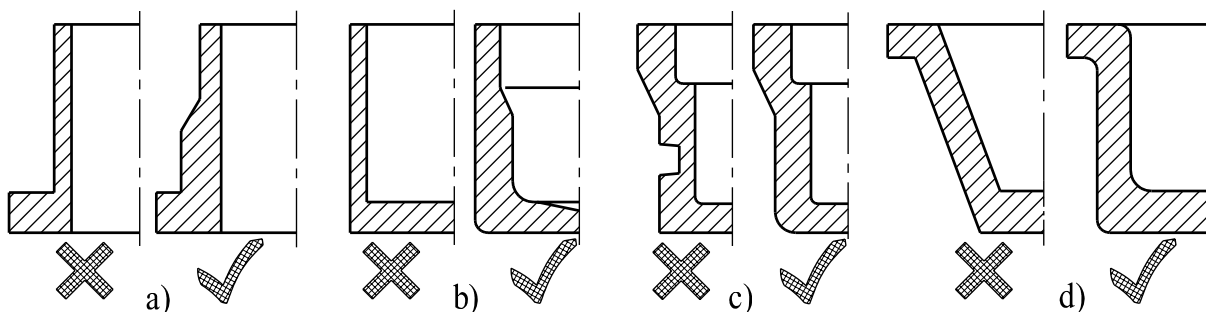
Objemovým tvářením za studena lze vyrobit širokou škálu tvarů a rozměrů výlisků. Při navrhování nových výrobních postupů se však musí dbát na řadu omezujících technologických pravidel.

Rozměry navrhovaných nových výlisků jsou omezeny výkonovými parametry uvažovaného stroje (jmenovitá tvářecí síla, dráha beranu), ale především maximální únosností sestavy nástroje. Obecně je při objemovém tvářením za studena průtlačnice z nástrojových ocelí doplněná až několika armovacími objímkami schopna snášet tlaková namáhání v rozsahu 1600 až 2500 MPa. V celosvětové produkci se objevují i výlisky o průměru až 200 mm a délky do 1,5 m. Dalším omezujícím faktorem je tloušťka stěny. Ta se převážně pohybuje v rozmezí 0,5 až 15 mm.

Při navrhování *tvarů a geometrie* výlisků je nutno mít na paměti specifické vlastnosti tvářeného materiálu tak, aby se docílilo snížení namáhání nástrojů a opotřebení jeho funkčních ploch. Toho je docíleno vhodnými konstrukčními úpravami prvků nástroje. Příliš složité tvary výlisků kladou zvýšené nároky na tvařitelnost materiálu, mají negativní vliv na výsledné rozložení zpevnění ve výlisku, nesou s sebou riziko tvorby napěťových vrubů a zvyšují potřebný počet výrobních operací.

Mezi všeobecně platné zásady pro navrhování tvarů výrobků objemového tvářením za studena patří níže uvedený výčet doplněný schematickým znázorněním na obr. 3.25.

- 1) navrhovat osově symetrické tvary, bez místního nahromadění materiálu;
- 2) vyvarovat se náhlým změnám průřezu, ostrým hranám a rohům, které brzdí tok materiálu a zvyšují tvářecí sílu => riziko vzniku vrubů => navrhovat vhodné přechodné zesílení – náběhové úhly a dostatečná zaoblení (obr. 3.25 a, b);
- 3) nevytvářet náhlá zúžení průřezu (obr. 3.25c);
- 4) vnitřní i vnější plochy pokud možno rovnoběžné s pracovní dráhou nástroje, plochy přednostně válcové (obr. 3.25d);
- 5) vyvarovat se příliš tenkým dnům => roste deformační odpor materiálu;
- 6) díry ve výlisku nemají být menšího průměru než cca 10 mm, neprůchozí otvory smí dosahovat hloubek nejvýše dvojnásobku jeho průměru (jinak zvýšené namáhání částí nástroje);
- 7) případné dlouhé kuželové plochy nahrazovat odstupňovaným válcovým průřezem – protlačování kuželu je energeticky náročné z důvodu navýšení třecího odporu.



Obr. 3.25 Technologické zásady navrhování tvarů [17]

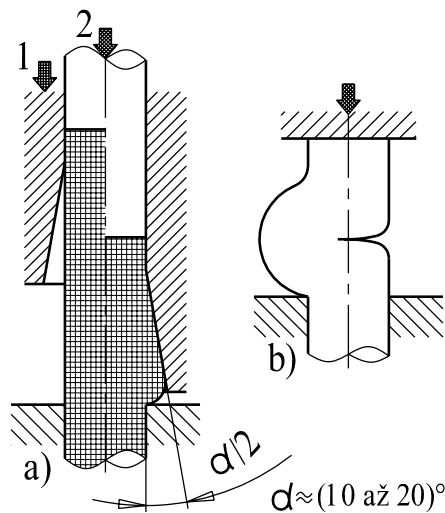
Specifické omezující faktory jednotlivých metod OTS:

A) Pěchování:

V případě volného pěchování je omezujícím faktorem tzv. pěchovací poměr, který je dán podílem pěchované výšky špalíku H_0 a výchozího průměru pěchovaného materiálu D_0 .

$$s = \frac{H_0}{D_0}. \quad (3.11)$$

Nepřesahuje-li pěchovací poměr hodnotu $s = 2,3$, je možno provést pěchování v jedné operaci. Do hodnoty $s \leq 4,5$ je pěchování prováděno s využitím předpěchování hlavy do tvaru „hrušky“ (obr. 3.26a) s následným dopěchováním do žádaného tvaru. Pokud není provedeno předpěchování, dochází k tvorbě vad – vybočení a tzv. přeložek (obr. 3.26b), což znamená styk vnějších ploch bez vzájemné silové vazby. To způsobuje zeslabení průřezu a vznik vrubu.

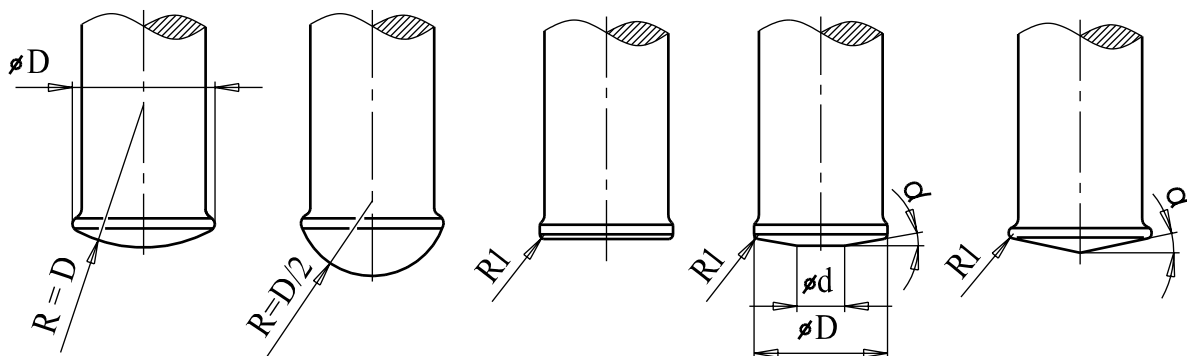


Obr. 3.26

a) poměry při pěchování,
b) přeložka

B) Zpětné protlačování:

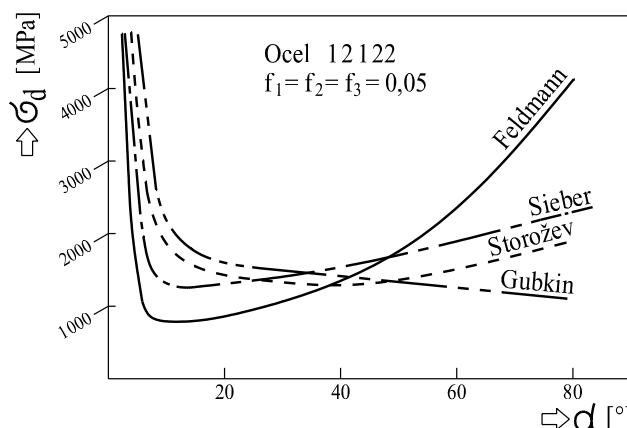
U této metody je hlavním problémem velký deformační odpor potřebný k vytvoření kalíšku s potřebnou hloubkou vnitřní dutiny a určitou tloušťkou dna. Deformační odpor omezuje funkční rozměry průtlačníku, jehož maximální poměr délky ku průměru činí 3:1. Tento deformační odpor lze částečně snížit volbou vhodného tvaru čela průtlačníku. Tvar čela průtlačníku se volí s ohledem na výchozí rozměry polotovaru a konečné geometrické proporce výlisku (tloušťka stěny a dna, výška výlisku atd.). Nejobvyklejším provedením bývá průtlačník s kuželovým čelem, které zajistí pravidelné roztažení vrstvy maziva po dutině protlačku. Typické tvary čela průtlačníků jsou uvedeny na obr. 3.27.



Obr. 3.27 Tvary funkčních ploch průtlačníků pro zpětné protlačování [2]

C) Dopředné protlačování:

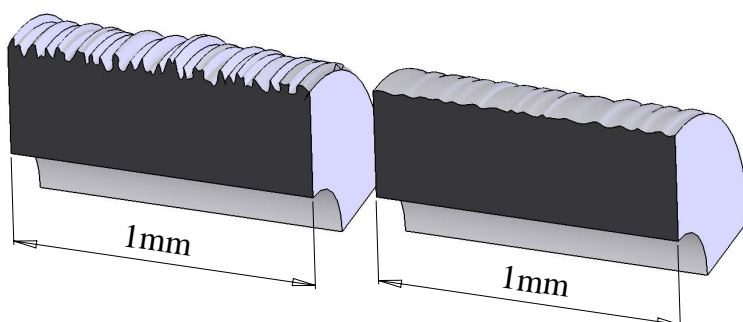
Oproti zpětnému protlačování není u této metody délka výlisku závislá na délce průtlačníku. Nejdůležitějším parametrem u dopředného protlačování je úhel redukční kuželové části průtlačnice. Jeho optimální hodnota se stanovuje s ohledem na procesní podmínky protlačování podle několika různých metod řešení (viz. obr. 3.28). Běžně se pro úhly kužele doporučuje hodnota $2\alpha = 30 \div 60^\circ$. Závisí také na vlastnostech materiálu, požadovaném tvaru výlisku a zejména na podmínkách tření. Dlouhý kužel dřívku je nežádoucí – dochází k nárůstu protlačovací i vyhazovací síly a hrozí zadírání materiálu na ploše kužele. Nevhodně zvolený úhel kužele spolu se zhoršenými procesními podmínkami (redukce průřezu, nedostatečné mazání) může vést k iniciaci vnitřních trhlin, chevronů.



Obr. 3.28 Závislost deformačního odporu materiálu na redukčním úhlu kužele [3]

Přesnost rozměrů a geometrické tolerance výlisku jsou závislé na mnoha činitelích vstupujících do výroby. Závisí na seřízení stroje, tuhosti a opotřebením nástroje, použitém způsobu mazání a vstupní přesnosti rozměrů polotovaru a jakosti zpracovávaného materiálu. Přesnost a geometrii příčných rozměrů výlisků lze dle všeobecných tolerancí (viz. ČSN ISO 2768-1) zařadit do třídy **f** a **m**, tedy jemná a střední. Délkové rozměry výlisků není doporučeno tolerovat, protože jsou výrazně ovlivněny přesností přípravy polotovaru. Nejdůležitějším úkolem v technologické fázi návrhu výroby je nalézt vhodný kompromis mezi přesností výlisku a jeho cenou. Příliš vysoké nároky na přesnost součásti neúměrně navyšují její výrobní cenu (lepší stroj, dražší nástroje, kvalitnější materiály a tepelné zpracování atd.), která musí být opodstatněná. Novému uvedení součásti do výroby objemovým tvářením za studena zpravidla předchází důkladná ekonomická kalkulace nákladů spojených s výrobou podle požadavků daných výrobním výkresem.

Jakost povrchu součástí vyráběných protlačováním za studena je velmi vysoká díky speciálním podmínkám tření mezi dutinou nástroje a fosfátovou vrstvou na povrchu polotovaru. Povrchová vrstva je rovněž značně zpevněná díky velkým měrným tlakům v nástroji. To se příznivě projevuje zlepšením mechanických vlastností součásti (odolnost vůči vrubům), zvýšením otěruvzdornosti a kluzných vlastností takových povrchů.



Obr. 3.29
Porovnání povrchových
profilů v řezu – vlevo jemně
soustružený, vpravo protlačený
za studena [17]

3.6 Základní technologické výpočty [2], [3], [12], [17], [18]

Od nového návrhu výroby součásti objemovým tvářením za studena se očekává co nejvyšší využití výhod této technologie uvedených v kapitole 3.3. Podmínkou pro splnění těchto požadavků je správně vypracovaný technologický postup, který by měl zohledňovat veškeré parametry kladené na finální součást tak, aby byla schopna spolehlivého a bezpečného provozu. Součástí takového technologického postupu je rovněž volba vhodného tvaru polotovaru, stanovení potřebného objemu materiálu a zejména nejvýhodnější počet a sled jednotlivých operací k dosažení konečného tvaru součásti.

Stanovení objemu součásti:

Při výpočtu objemu materiálu polotovaru se vychází z předpokladu konstantního objemu během změny tvaru podle vztahu (3.12). Vlastní objem součásti se určuje součtem objemů elementárních těles (válců, prstenců, kvádrů, kuželů, kulových vrchlíků atd.), které vzniknou vhodným rozkladem konečného tvaru vylisku. Příklad takového rozkladu je znázorněn na obr. 3.31. Takto vypočtený objem se dále navyšuje o technologický přídavek na dělení materiálu zohledňující nepřesnosti při přípravě polotovaru z tyčí a drátů. Tento přídavek se volí podle druhu polotovaru a způsobu dělení kolem 5 % objemu vylisku.

Zákon konstantního objemu při tvářením pro hranol (obr. 3.30):

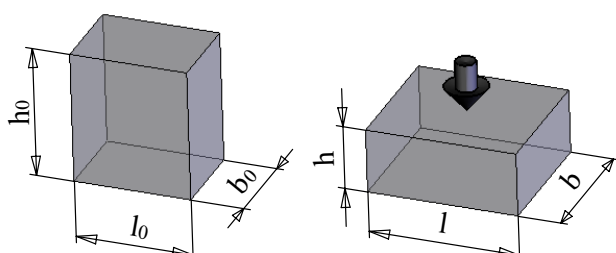
$$V_0 = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h \cdot b \cdot l = V = konst. \quad (3.12)$$

Po úpravě

$$\frac{h \cdot b \cdot l}{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0} = 1, \quad (3.13)$$

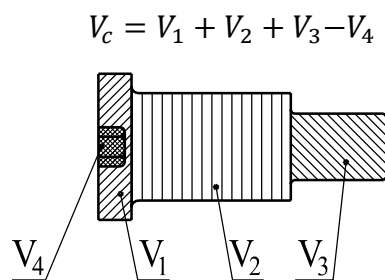
a zlogaritmování dostaneme:

$$\ln \frac{h}{h_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{l}{l_0} = \varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0. \quad (3.14)$$



Obr. 3.30

Změna rozměrů hranolu při tvářením –
zákon konstantního objemu



Obr. 3.31

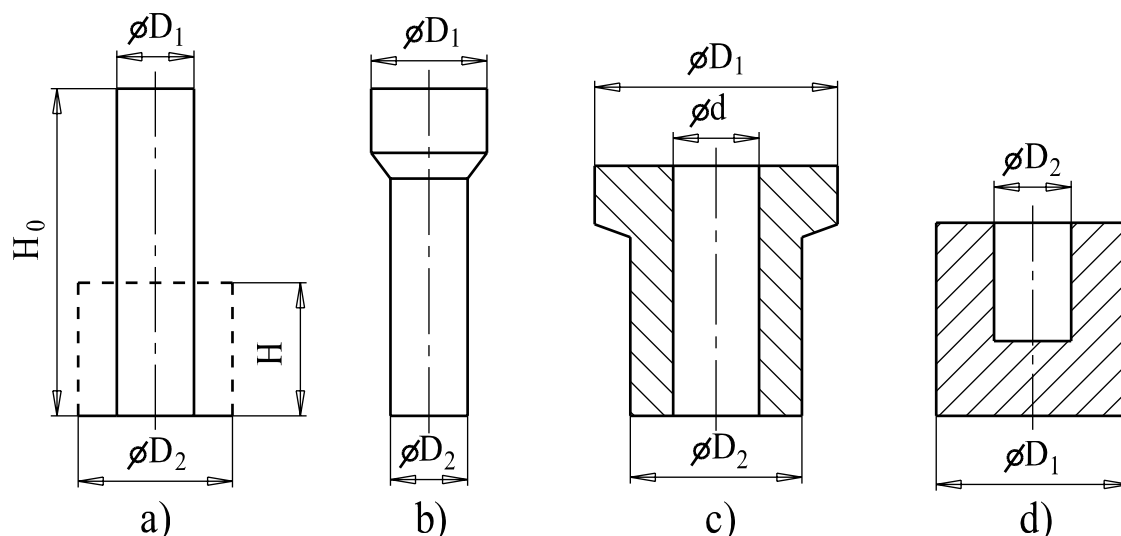
Rozložení součásti typu
čep na elementární
objemová tělesa [18]

Určení tvaru a rozměrů výchozího polotovaru:

U rozhodování o tvarech a rozměrech výchozího polotovaru hrají důležitou roli parametry hotového vylisku. Platí, že výchozí polotovar by měl po tvarové stránce co nejvíce odpovídat vyráběnému vylisku. Polotovary lze podle tvaru klasifikovat jako:

- I. plná tělesa (kruhové špalíky – dlouhé, kruhové kaloty – malá výška),
- II. dutá tělesa (špalíky s otvorem, mezikruží z plechu, prstence),
- III. speciální tvary (předlisované tvary, profily, trubky, výkovky atd.).

Výpočet přetvoření pro základní způsoby tváření za studena:



Obr. 3.32 Parametry logaritmického přetvoření základních způsobů OTS [2]

A) pěchování plného tělesa (obr. 3.32a):

$$\varphi_h = \ln \frac{H_0}{H} \quad \varepsilon_h = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (3.15)$$

$$\varphi_s = \ln \frac{S_2}{S_1} = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad \varepsilon_s = \left[1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right] \quad (3.16)$$

B) dopředné protlačování plného tělesa (obr. 3.32b):

$$\varphi = \ln \frac{S_2}{S_1} = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right] \quad (3.18)$$

C) dopředné protlačování tělesa s dutinou (obr. 3.32c):

$$\varphi = \ln \frac{S_2}{S_1} = \ln \frac{D_2^2 - d^2}{D_1^2 - d^2} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon = \frac{S_1 - S_2}{S_1} = \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2 - d^2} \quad (3.20)$$

D) zpětné protlačování kalíšku (obr. 3.32d):

$$\varphi = \ln \frac{S_2}{S_1} = \ln \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right) = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (3.22)$$

S vyjadřuje plochu průřezu v $[\text{mm}^2]$; ε může být vyjádřeno také v [%] jako stupeň deformace.

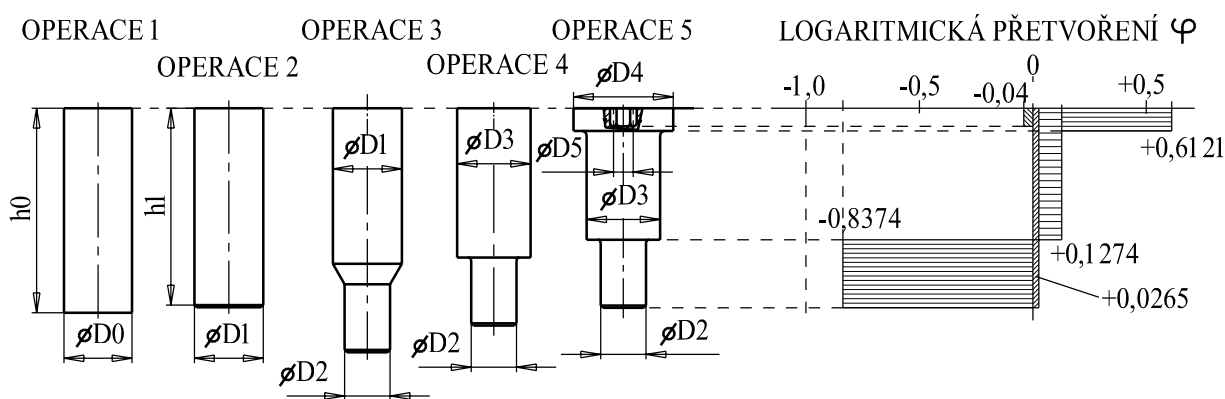
Určení technologického postupu lisování:

Technologickým postupem lisování se rozumí sled jednotlivých tvářecích operací vedoucích ke změně polotovaru do tvaru a rozměrů požadovaného výlisku, a to včetně případných mezioperačních úprav (tepelné zpracování, úprava povrchu atd.). Počet tvářecích operací je možno určit z celkového logaritmického přetvoření hotového výlisku. Při návrhu postupu je nezbytné pamatovat na to, že každá jednotlivá tvářecí operace vyčerpá příslušnou hodnotu z celkové zásoby plasticity materiálu. Ta je vyjádřena maximální mírou možného logaritmického přetvoření kovu dosažitelného bez nutnosti zařazení rekrytalizačního žíhání.

Součásti jednoduchého tvaru lze vyrábět v jediné operaci, složitější se zhotovují ve více tvářecích operacích. Na počet operací má vliv také použitý materiál (jeho chemické složení, zejména obsah uhlíku a legujících prvků).

Tab. 3.2 Přípustné deformace a přetvoření pro základní metody tváření za studena [17]

Způsob tváření		pro změnu průřezu		pro změnu výšky	
		ε	φ	ε	φ
Zpětné protlačování		0,40 – 0,75	0,51 – 1,4	-	-
Dopředné protlačování	uzavřené	0,30 – 0,95	0,37 – 3,0	-	-
	volné	0,05 – 0,30	0,05 – 0,37	-	-
Pěchování		-	-	0,40 – 0,80	0,51 – 1,61



Obr. 3.33 Příklad technologického postupu výroby součásti typu čep včetně dosažených přetvoření u přítomných operací [18]

3.7 Výpočet odporů a sil při tváření za studena [1], [2], [3], [12], [17]

3.7.1 Přetvárné odpory ve tváření, tvářecí síla, práce a výkon

Přetvárný odpor je vlastnost materiálu odolávat plastické deformaci způsobené vnějšími silami. Je vyjádřen mechanickým napětím a jednotkou je 1 [MPa] neboli 1 [N/mm²]. Rozeznáváme:

Přirozený přetvárný odpor σ_p – je vnitřní odpor materiálu (fyzikální vlastnost) vůči působení vnějších sil, definovaný pro jednoosý stav napjatosti a konkrétní termomechanické podmínky:

- chemické složení, stav a struktura materiálu (čistota, zrna, pevnost a houževnatost atd.),
- stupeň přetvoření φ ,
- teplota tváření T ,
- rychlost přetvoření $\dot{\varphi}$.

Závislost přirozeného přetvárného odporu σ_p v průběhu přetvoření φ pro konstantní teplotu a rychlost přetvoření je vyjádřena křivkami přetvárných odporů. Ty se získají buď výpočtem vhodnou matematickou aproximací, anebo experimentálně konvenčními (tahová, pěchovací, krutem) a speciálními zkouškami. Příklad záznamu pěchovací zkoušky oceli 12 010.3 je uveden v příloze 1.

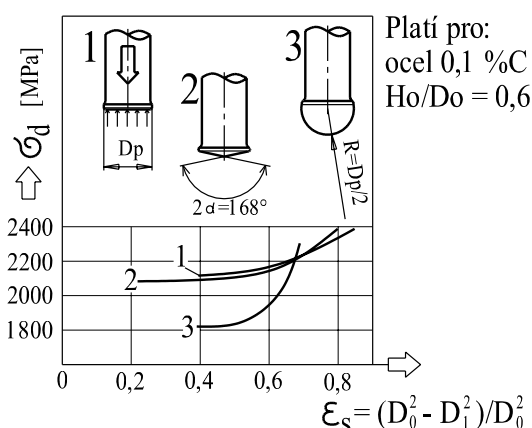
Deformační odpor σ_d (technologický přetvárný odpor) – je součtem přirozeného přetvárného odporu σ_p a vlivu pasivních odporů doprovázejících konkrétní technologii tváření. Tyto pasivní odpory vznikají vlivem:

- zejména tření,
- změny geometrie tělesa,
- změn teplotních podmínek,
- nerovnoměrné napjatosti nebo lokálních změn rychlosti přetvoření.

Dále je σ_d ovlivňován zaplněním tvářecího nástroje nebo konečným tvarem a kontaktní plochou součásti. Deformační odpor je obecně vyjádřen vztahem

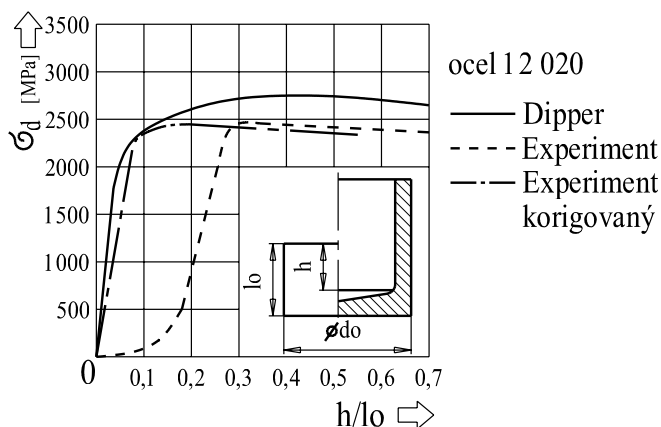
$$\sigma_d = \sigma_d(\sigma_p, M), \quad (3.23)$$

kde M je souhrnný součinitel uvažující všechny výše uvedené pasivní odpory tváření. Stanovení deformačního odporu je v praxi velmi obtížné. K jeho správnému určení je zapotřebí dokonalá znalost výchozího stavu materiálu a přesně dané podmínky tváření. Obecně platí, že deformační odpor klesá výrazně s rostoucí teplotou, čisté kovy mají nižší deformační odpor než tuhé kovové roztoky a slitiny a k nárůstu σ_d dojde, pokud se zvýší rychlost přetvoření.



Obr. 3.34

Vliv čela průtláčnicku na deformační odpor při zpětném protlačování [1]



Obr. 3.35

Porovnání průběhu deformačního odporu zjištěného experimentem a výpočtovým modelem dle Dippera [1]

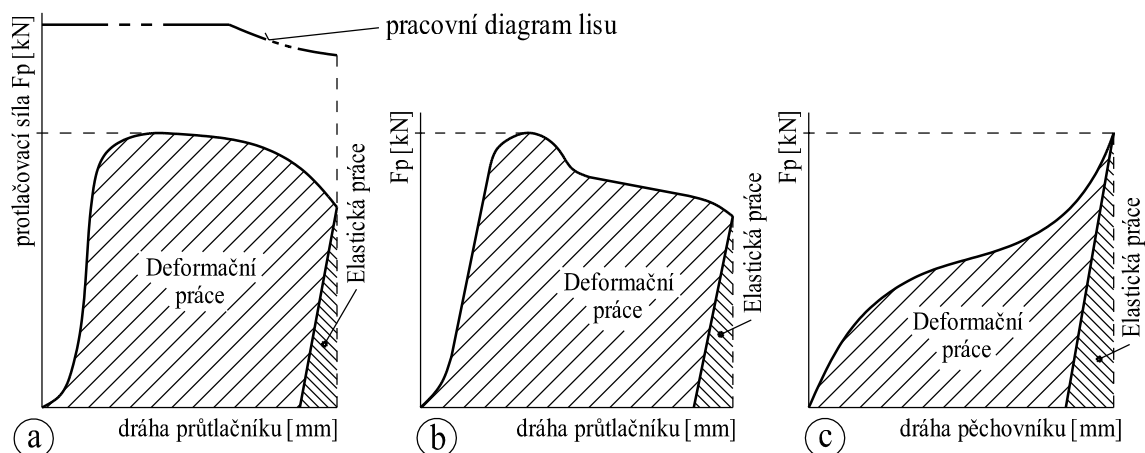
Střední přirozený přetvárný odpor σ_{ps} – hodnota využívaná v modelových výpočtech deformačních odporů. Získá se výpočtem z průběhu křivky zpevnění s využitím měrné přetvárné práce A_j [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$] podle vzorce

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi_k} \sigma_p \cdot d\varphi = \frac{A_j \cdot 1000}{\varphi} \quad [\text{MPa}]. \quad (3.24)$$

Tvářecí síla – k provedení požadované tvářecí operace je zapotřebí dostatečné tvářecí síly, která ovšem nesmí přesáhnout jmenovitou sílu použitého lisu. Maximální hodnota potřebné tvářecí síly se vypočítá ze základního vztahu

$$F = \sigma_d \cdot S \quad [\text{kN}]. \quad (3.25)$$

S vyjadřuje průmět činné plochy nástroje, na který působí tvářecí síla [mm^2]. Při volbě klikových či kolenových lisů pro objemové tváření je potřeba znát průběh tvářecí síly, aby bylo možno jej porovnat s pracovním diagramem lisu (*síla – dráha*) a zabránit přetížení stroje nepřípustným krouticím momentem.



Obr. 3.36 Zobecněná schémata pracovních diagramů základních metod OTS:
a) zpětné protlačování [1], b) dopředné protlačování [1], c) pěchování [2]

Tvářecí práce – výpočet práce a výkonu slouží k ověření zatížitelnosti komponent mechanismu pohonu lisu (elektromotor, setrvačnik, převody atd.).

Tvářecí práce:

$$A = V \int_0^{\varphi} \sigma_d \cdot d\varphi \quad [\text{J}], \quad (3.26)$$

nebo pomocí součinitele plnosti pracovního diagramu $\lambda = \frac{\text{plocha pod křivkou}}{\text{plocha obdélníku}} \cdot 100\%$:

$$A = \sigma_{d \max} \cdot \varphi_{\max} \cdot V \cdot \lambda \quad (3.27)$$

kde V ... objem tvářeného materiálu [mm^3],
 $\sigma_{d \max}$... maximální dosažený deformační odpor [MPa],
 φ_{\max} ... maximální dosažené přetvoření,
 λ ... součinitel plnosti ($\lambda < 1$).

Celková práce vykonaná soustavou stroje zahrnuje také práci pružných sil:

$$A_c = A + A_p \quad [\text{J}], \quad (3.28)$$

$$A_p = \frac{1}{2} \cdot F \cdot y \quad (3.29)$$

kde A_p ... práce pružení lisu [J],
 y ... pracovní dráha beranu spotřebovaná pružením stroje [mm].

Měrná přetvárná práce – představuje plochu pod křivkou $\sigma_d(\varphi)$:

$$A_j = \frac{A}{V} = \int_0^{\varphi_k} \sigma_d \cdot d\varphi \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (3.30)$$

Tvářecí výkon – je vyjádřen prostřednictvím celkové tvářecí práce stroje (dle [2]):

$$P = \frac{A_c \cdot n}{t \cdot 102 \cdot 1000} \quad [\text{kW}], \quad (3.31)$$

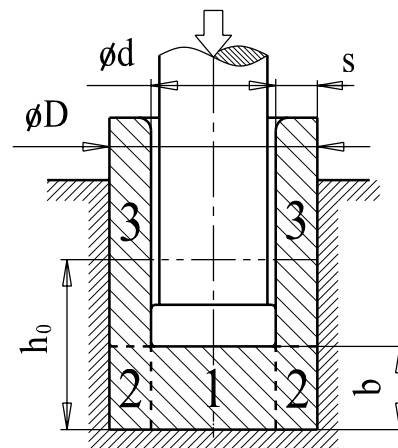
kde n ... počet zdvihů lisu $\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$,
 t ... doba trvání jednoho zdvihu [s].

Potřebný výkon lisu je tvořen součtem tvářecího výkonu, výkonu pomocných mechanismů lisu a výkonu pro běh stroje naprázdno.

3.7.2 Výpočtové modely řešení zpětného protlačování

S ohledem na zaměření diplomové práce na metodu zpětného protlačování, je přehled výpočtových modelů vyhrazen právě této technologii.

V této části jsou shrnuty nejčastěji používané metody řešení výpočtu deformačních odporů včetně charakteristických podmínek řešitelnosti daného postupu. Tyto metody vychází z principu usměrněného vtlačování průtláčnicku do tělesa polotovaru, který je uzavřen v průtláčnici. Tok kovu probíhá prstencem daným průměrem průtláčnice a průtláčnicku. Základní parametry jsou zřejmé z obr. 3.37.



Obr. 3.37
Parametry geometrie
zpětného protlačování

Zpětné protlačování podle Siebela:

- v praxi často využívaný model (zaveden v ČSN 22 7005) pro ocelové a mosazné kalíšky,
- omezením je tloušťka stěny $s > 0,1 \cdot d$,
- neuvažuje konečnou výšku dna protlačku b .

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D^2}{d^2} \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (3.32)$$

kde σ_p je přirozený přetvárný odpor materiálu [MPa].

Zpětné protlačování podle Dippera:

- tato metoda považuje proces zpětného protlačování jako dvojité pětchování v oblasti 1 pod průtláčnickem (obr. 3.37) a v oblasti mezikruží prstence 2. V oblasti 3 již kov tvoří tuhé spojitě kontinuum,
- součinitel tření mezi zónami 1 a 2 činí $f_2 = 0,5$,
- vzrůst deformačního odporu po dosažení hloubky dna $b = (0,2 \text{ až } 0,3) \cdot d$.

$$\varepsilon_s = \frac{s - s_d}{s} = \frac{d^2}{D^2} \geq (0,5 \div 0,6) \quad (3.33)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b} \quad \varphi_2 = \varphi_c - \varphi_1 \quad \varphi_c = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s} \right) \quad (3.34)$$

$$f_{2 \text{ stř}} = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.35)$$

$$\sigma_d = \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d}{b} \right) \cdot \sigma_{p1} + \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2 \text{ stř}}}{D - d} \cdot b \right) \cdot \sigma_{p2s} \quad [\text{MPa}] \quad (3.36)$$

kde

$$\sigma_{p2s} = \frac{(A_{jc} - A_{j1}) \cdot 1000}{\varphi_2} \quad (3.37)$$

Zpětné protlačování podle Sachse:

- metoda vychází z předpokladu plastického přetvoření materiálu mezi tuhým kuželem pod čelem průtlačníku a stěnou průtlačnice,
- zanedbává tření na stěně průtlačnice,

$$\sigma_d = 1,58 \cdot \sigma_{pc} \cdot \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad [\text{MPa}] \quad (3.38)$$

Zpětné protlačování podle Thomsena:

- jedná se o variantu Siebelova řešení, uvažující tření na stěně průtlačnice,
- řešení metodou kluzových čar:

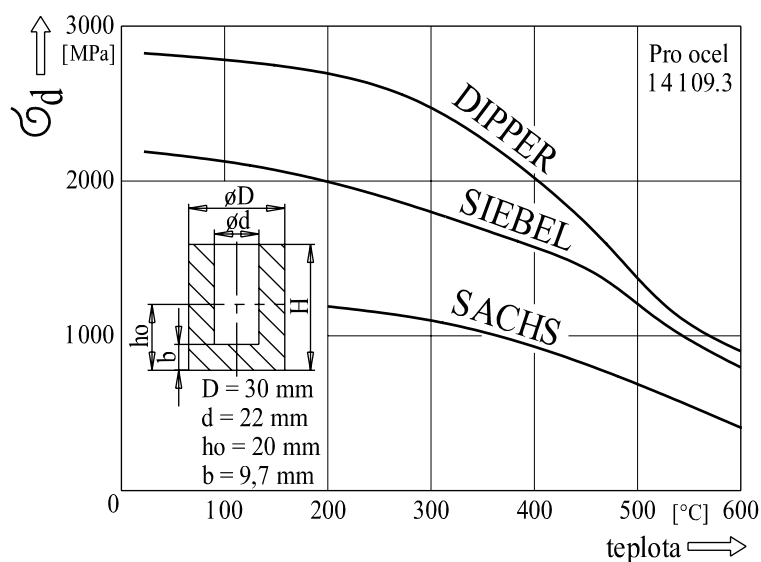
$$\sigma_d = 2,97 \cdot \sigma_{pc} \quad [\text{MPa}] \quad (3.39)$$

- řešení metodou horní meze:

$$\sigma_d = 3,32 \cdot \sigma_{pc} \quad [\text{MPa}] \quad (3.40)$$

Zpětné protlačování podle Storoževa a Popova:

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left[2 + \left(1 + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \right) \cdot \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{1}{6} \cdot \frac{d}{b} \right] \quad [\text{MPa}]. \quad (3.41)$$



Obr. 3.38 Vliv teploty na deformační odpory získané různými metodami řešení [3]

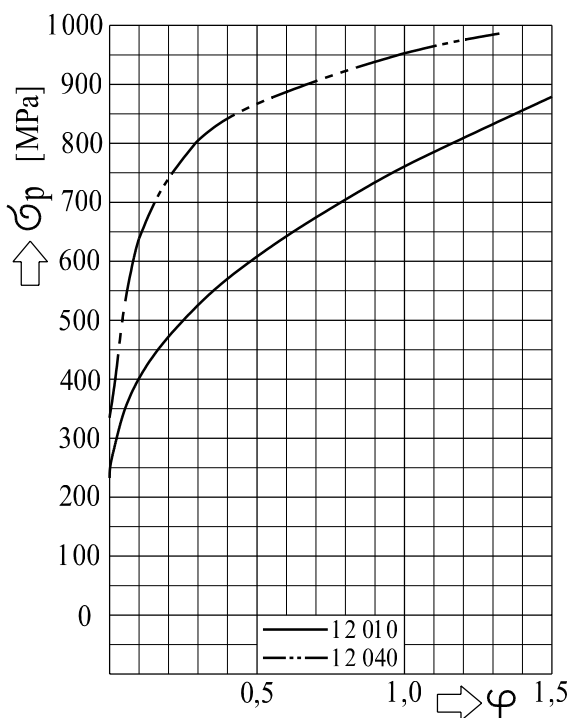
3.8 Materiály pro objemové tváření za studena, příprava polotovarů [1], [16], [17], [19]

3.8.1 Oceli pro OTS

Materiály vhodné pro protlačování za studena mají být obecně tvárné, bez výrazného deformačního zpevnění, mají mít jemnozrnnou strukturu bez velkého obsahu vad a příměsí a pokud možno s izotropními mechanickými vlastnostmi. Materiál součásti se volí v závislosti na jejím konečném tvaru (počet tvářecích operací), požadovaných mechanických a fyzikálních vlastnostech výrobku a zejména na ekonomické výhodnosti výroby.

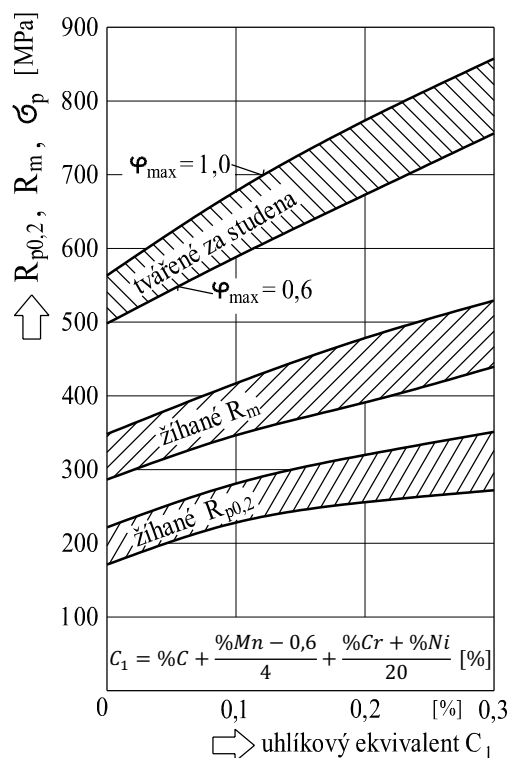
Mezi oceli, které lze snadno protlačovat za studena, se především řadí nízkouhlíkové a nízkolegované, částečně střednělegované oceli. Platí, že s rostoucím obsahem uhlíku roste potřebný deformační odpor oceli, což negativně ovlivňuje životnost nástrojů a tím také hospodárnost výroby. V praxi se vhodnost oceli k protlačování posuzuje podle chemického složení, maximálního dosažitelného přetvoření, mechanických vlastností, průběhu křivek přetvárných odporů a struktury zrna. K vyhodnocení tvažitelnosti slouží klasická pěchovací zkouška na hydraulických lisech nebo speciální druhy zkoušek simulující konkrétní podmínky protlačování.

Chemické složení výrazně ovlivňuje tvažitelnost ocelí za studena. Nejvýznamnější vliv má obsah uhlíku, doporučuje se do 0,45 % C (dle [17]), ale také přítomnost legujících prvků. Uhlík zásadně zvyšuje pevnost a deformační odpor ocelí. Pokud je uhlíku a legur více, provádí se pro zlepšení tvažitelnosti tepelné zpracování v podobě žíhání na měkko nebo kombinace žíhání normalizačního a na měkko. To zajistí zjemnění a sferoidizaci zrna a tím rovněž lepší plastické vlastnosti materiálu. Dále by měla být ocel prosta prvků (fosfor, síra, křemík, dusík), které zvyšují tvrdost i křehkost, čímž znesnadňují přetvoření materiálu. Vliv obsahu uhlíku a hlavních legujících prvků na vlastnosti ocelí tvářených za studena je znázorněn na obr. 3.40 pomocí uhlíkového ekvivalentu C_1 .



Obr. 3.39

Porovnání křivek přetvárných odporů ocelí 12 010 (~0,08 %C) a 12 040 (~0,35 %C) [16], [17]



Obr. 3.40 Vliv obsahu uhlíku a legujících prvků na mechanické vlastnosti oceli ve výchozím stavu a po protlačování za studena [1]

Mechanické vlastnosti výchozího materiálu k protlačování za studena by neměly být příliš citlivé na stupeň deformace. Pro oceli snadno tvařitelné za studena se uvádí doporučený poměr meze kluzu a meze pevnosti

$$0,5 \leq \frac{R_e}{R_m} \leq 0,6. \quad (3.42)$$

Od oceli se vyžaduje dosažení vysokého stupně přetvoření bez porušení a nutnosti mezioperačně tepelně zpracovat. Tomu odpovídají zejména oceli s hodnotou kontrakce $Z \geq 0,55$ a nízkou mezí kluzu.

Struktura ocelí pro OTS bývá feritická nebo feriticko-perlitická, nejlépe s globulárním perlitem, který zaručí dostatečnou tvárnost a houževnatost. Jakost vyrobené součásti ovlivňuje v první řadě jakost materiálu polotovaru, z něhož se vyrábí. Ta je dána druhem polotovaru (dráty, tyče, trubky, plechy), způsobem zpracování (válcování za tepla, tažené za studena) a přesností výroby. Ocel musí vykazovat kvalitní neporušený povrch a zároveň homogenní vnitřní strukturu bez velkého množství vad (bubliny, vměstky, převalky, okuje, trhliny – chevrony, segregace atp.). Běžné množství jemně rozptýlených vměstků z výroby polotovaru se dá úspěšně „odstranit“ v průběhu realizace tvářecích operací.

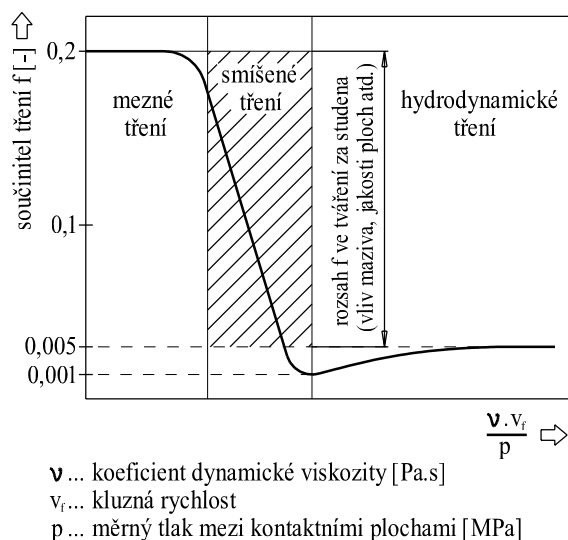
3.8.2 Příprava polotovaru pro tváření za studena, mazání ve tváření

Příprava polotovaru pro protlačování součástí za studena spočívá v oddělení přesného objemu kovu z hutního polotovaru o různém průřezu s cílem dosáhnout co nejvyšší úspory materiálu a optimálního průběhu tvářecí operace. Dělení tyče (drátu, trubky, plechu) předchází úprava jejího povrchu pro zlepšení jakosti výlisku a aplikace vrstvy vhodného maziva pro optimalizaci procesních podmínek tváření před zavedením polotovaru do pracovního prostoru nástroje a provedením první tvářecí operace.

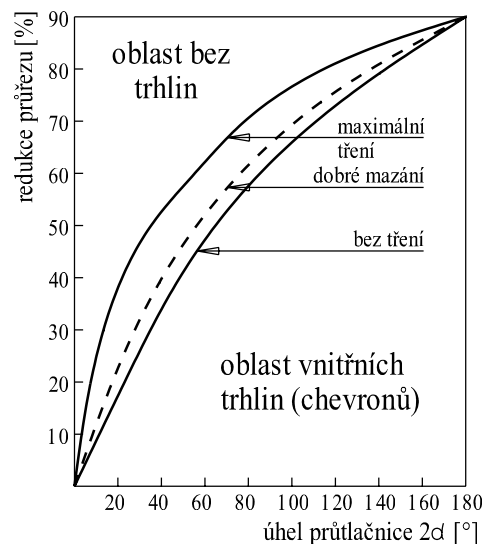
Dělení tyče na požadované špalíky se děje strojním řezáním na kotoučových nebo pásových pilách nebo ustřižením tvarovými noži v nástroji. Výhodou řezání na pile je dosažení přesných rozměrů a přímosti špalíku nebo kvalitní nezpevněné čelní plochy. Nevýhodou je naopak snížení produktivity a vyšší odpad materiálu, který narůstá spolu s rozměry polotovaru. Tyto nevýhody je možno eliminovat použitím dělení polotovaru stříháním. Je to vysoce produktivní způsob využitelný v hromadné výrobě. Nedostatkem je nerovná plocha čela špalíku s mírným deformačním zpevněním. Ve většině případů je proto nutné zvýšit počet operací postupu o jeden krok, ve kterém dojde k zarovnání čela a kalibraci tvaru a rozměrů.

Příprava povrchu polotovaru má za cíl snížit tření mezi povrchem polotovaru a nástroje, eliminovat zadírání povrchových vrstev a omezit jeho korozi. Spočívá v důkladném odmaštění a očištění povrchu (mechanicky, mořením) a aplikaci nosných nekovových vrstev pro mazivo. Nejčastějšími nosnými vrstvami ve tváření uhlíkových ocelí za studena bývají fosfátové, příp. fosfát-zinkové povlaky s tloušťkou vrstvy kolem 10 μm . Ty jsou velmi porézní a snadno do sebe absorbují použité mazivo, jež spolehlivě odolává vysokým měrným tlakům během protlačování. Pro vysoce namáhané protlačky se používají nosné vrstvy povlaků z měkkých kovů, např. mědi, zinku, olova a cínu.

Volba maziva závisí hlavně na materiálu protlačku a procesních podmínkách tváření (stupeň deformace, rychlost deformace, dosahované tlaky v nástroji atd.). Účelem mazání je především snížit vliv tření na deformační odpor materiálu při jeho tváření. Jako mazivo se používá grafit (dnes omezeně), stearát zinku, sirník molybdeničitý MoS_2 , mýdlové emulze nebo rostlinné i minerální oleje a tuky s aditivy pro vysoké tlaky.



Obr. 3.41
Hodnoty součinitele tření f dosahované ve tváření za studena (Striebeckův diagram oblastí tření) [3]



Obr. 3.42 Diagram závislosti vzniku centrálních trhlin na podmínkách tření, změny průřezu a redukčním úhlu při dopředném protlačování [19]

3.9 Nástroje pro objemové tváření za studena [1], [2], [6], [8], [12], [17], [20], [23]

Pro dosažení jedné z nejvýznamnějších předností objemového tváření za studena – hospodárnosti výroby – je nutné zajistit dostatečnou životnost nástroje, jehož cena tvoří významnou část výrobních nákladů výlisku. Požadované životnosti lze docílit vhodným konstrukčním řešením, optimální volbou materiálu, precizní jakostí výroby částí nástrojů a zajištěním účinného mazání polotovaru v dutině nástroje. Jednotlivé komponenty nástroje jsou během tvářecí operace vystaveny velkému rozsahu napětí, která mají charakter tlakový i tahový, ale zároveň také přítomnosti přídatných ohybových momentů. Nepříznivě na životnost působí zejména cyklická dynamická namáhání v činné oblasti lisovnic, vznikající nerovnoměrným napětím rostoucím od nuly až do své maximální hodnoty, a to při každém pracovním zdvihu stroje. Zároveň jsou nástroje, i přes charakter práce za studena, vystaveny střídavému tepelnému zatížení, které doprovází přetvoření materiálu polotovaru. Správné zhotovení nástroje, které respektuje výše uvedená kritéria, zajistí jeho odpovídající životnost a trvanlivost pro výrobu dostatečného množství kvalitních výlisků.

3.9.1 Materiály nástrojů

Na materiály nástrojů pro objemové tváření za studena jsou kladeny náročné a často protichůdné požadavky. Je třeba zajistit především tyto vlastnosti:

- ✓ vysoká tvrdost a pevnost,
- ✓ dostatečná houževnatost,
- ✓ odolnost proti opotřebení,
- ✓ dobrá prokalitelnost,
- ✓ dobrá obrobitelnost,
- ✓ homogenní struktura bez karbidických řádků,
- ✓ rozměrová stálost.

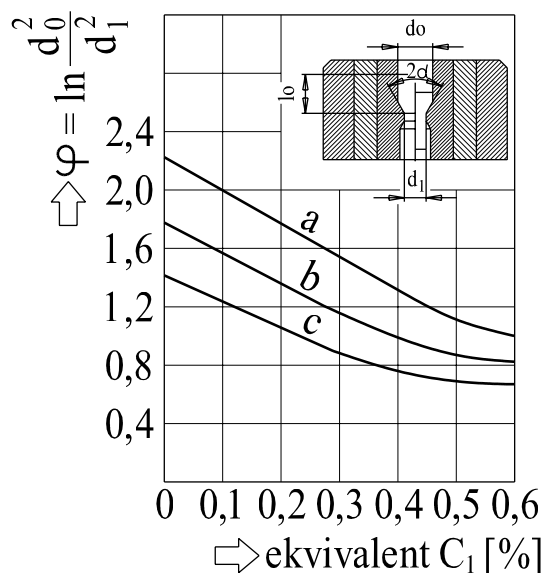
Samotná volba nástrojové oceli se odvíjí od uvažovaného výrobního postupu součásti a bere v potaz konkrétní procesní podmínky výroby. Proto je volba vhodného nástrojového materiálu také otázkou zkušenosti technologa a doporučuje se experimentální ověření jejích požadovaných vlastností.

V OTS se využívá především nízkolegovaných chromových ocelí a v případě vysokého namáhání a velkých sérií i některých druhů ocelí rychlořezných. Nejpoužívanější druhy ocelí pro funkční součásti tvářecích nástrojů včetně doporučeného použití jsou přehledně uvedeny v příloze 2 a 3.

Požaduje se martenzitická struktura obsahující pravidelně rozptýlené jemné karbidy (ne řádkovité) tvořené legujícími prvky, kterými jsou mimo chróm také vanad, wolfram, mangan, molybden a další.

Požadované struktury lze docílit pečlivým tepelným zpracováním nástrojových ocelí, zároveň ale je potřeba věnovat pozornost už zpracování oceli při výrobě. Zde je vhodné budoucí polotovary pro výrobu nástroje důkladně prokovat a následně vyžíhat. Samotné tepelné zpracování nástroje začíná normalizačním vyžíháním ke změně struktury, případně ke zjemnění zrna. Následuje kalení s rychlým zchlazením alespoň kritickou ochlazovací rychlostí, kdy vzniká tvrdá martenzitická struktura. Spolu s nárůstem tvrdosti ale roste křehkost a vytváří se vnitřní napětí. Proto se nástroj musí popustit (i několikanásobně), čímž dojde ke zlepšení houževnatosti, snížení pnutí a mírnému poklesu také tvrdosti. Kalicí a popouštěcí teploty a časy závisí na konkrétním chemickém složení materiálu nástroje. Doporučený postup tepelného zpracování je uveden v materiálových normách. Nakonec tepelného zpracování nástroje se doporučuje provést jeho vyvaření v oleji nebo vyžíhání k odstranění zbytkových pnutí.

Pro zvlášť namáhané povrchy funkčních částí lisovacích nástrojů je dobré provést jejich úpravu vrstvou povlaku z TiN. Anebo je možné pro vysoce namáhané části (nebo k výrobě vysoce přesných součástí) zvolit jako materiál *slinutý karbid* (SK). Jeho předností je vysoká tvrdost a trvanlivost, naopak nepříznivá je jeho cena v porovnání s konvenčními nástrojovými materiály. Přehled používaných SK je uveden v příloze 3.



Obr. 3.43 Porovnání životnosti radiálně předepjatých průtlačnic zhotovených z různých materiálů v závislosti přípustného skutečného přetvoření φ na chemickém složení protlačku [1]:
a – nástrojové oceli – životnost 10 000 ks,
b – slinutý karbid – životnost 100 000 ks,
c – slinutý karbid – životnost 300 000 ks.

Vysvětlivky oblastí:
nad křivkou – praskliny vlivem přetížení,
pod křivkou – únava materiálu nebo opotřebení

Pozn.:
stav polotovaru – žíhaný, fosfátovaný, mazaný;
 $l_0/d_0 = 1,5 \div 2,0$; $2\alpha = 60^\circ$; $\mu = 0,03 \div 0,05$;
ekvivalent C_1 viz obr. 3.40

3.9.2 Konstrukční provedení nástrojů

Nástroje pro OTS lze rozdělit dle složitosti a počtu tvářecích operací na:

- a) univerzální jednooperační,
- b) víceoperační pro běžné mechanické lisy,
- c) víceoperační pro postupové tvářecí automaty.

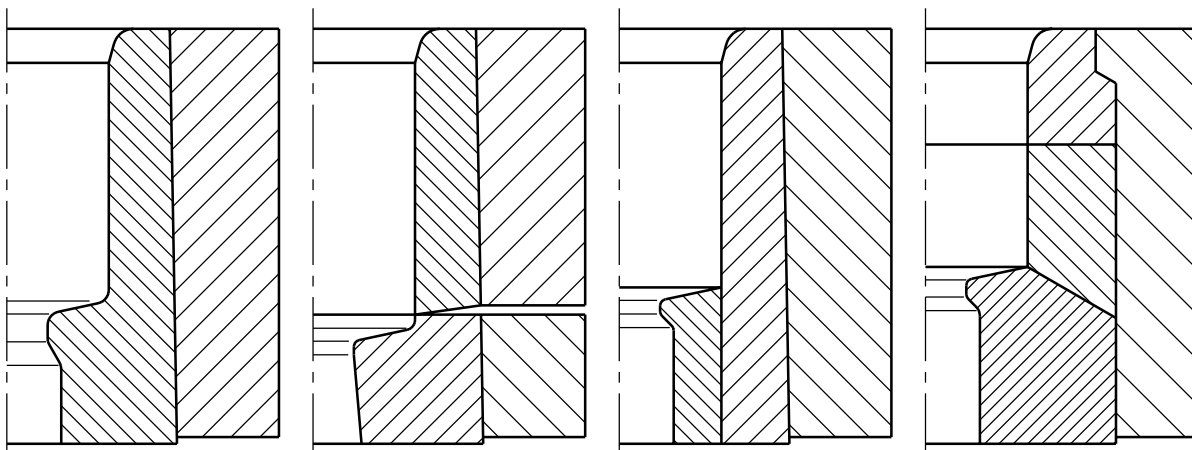
Tvářecí nástroj tvoří významný člen výrobního procesu tváření za studena a podstatně ovlivňuje výsledné vlastnosti vyráběné součásti. Takže jakost výlisku je přímo závislá na kvalitě konstrukčního návrhu a výrobním zhotovení nástroje. Na každý nově projektovaný nástroj jsou kladeny požadavky na zajištění spolehlivého, bezporuchového provozu, snadné údržby a seřízení, zajištění bezpečnosti práce a jednoduchosti obsluhy a v neposlední řadě také příznivé pořizovací ceny. Při návrhu nástroje je potřeba se držet základních pravidel a doporučení uvedených v ČSN, případně vycházet ze zkušeností či poznatků získaných z předešlých řešení. V přípravné fázi návrhu nástroje je potřeba zhodnotit navrženou technologii výroby součásti a pro ni rozhodnout o vhodném konstrukčním uspořádání. Volbu nástroje ovlivňuje například:

- materiál vyráběné součásti (pevnost, houževnatost, chemické složení),
- složitost tvaru výlisku,
- požadovaná přesnost a jakost povrchu,
- pevnostní parametry výlisku atd.

Mezi všeobecná doporučení pro konstrukci lisovacích nástrojů patří:

- ⇒ zajištění dostatečné tuhosti a zamezit pružné deformaci funkčních částí nástrojů,
- ⇒ snadná vyměnitelnost nejvíce namáhaných částí,
- ⇒ vhodně navržená zaoblení a přechody ploch nástroje v kontaktu s polotovarem,
- ⇒ co nejlepší zpracování povrchu funkčních částí,
- ⇒ zajistit dokonalé vedení pohyblivých součástí,
- ⇒ spolehlivé vyjímání protlačku z dutiny nástroje nebo jeho stírání z průtlačníku,
- ⇒ předepsat dokonalé upnutí nástroje na pracovní ploše lisu,
- ⇒ zajistit přívod a odvod maziva a chladiva, dále odvodušnění dutin nástrojů,
- ⇒ správně zvolit materiál, tepelné zpracování a povrchovou úpravu nástroje,
- ⇒ filtrování ořesů a rázů vznikajících provozem tvářecího stroje,
- ⇒ zvážit možnost automatizace výrobního procesu a další.

Konkrétní konstrukční směrnice pro návrh průtlačníků a průtlačnic zpětného, resp. dopředného protlačování jsou uvedeny v ČSN 22 7005.

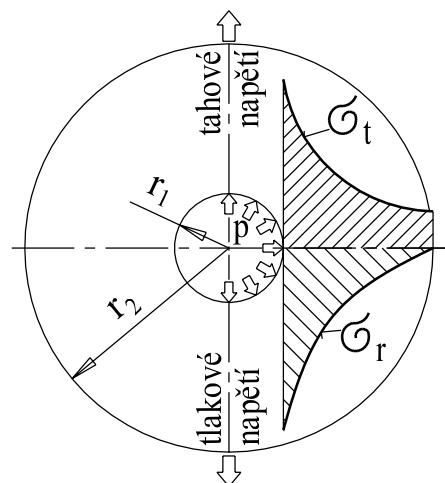


Obr. 3.44 Možnosti příčného a podélného dělení průtlačnic [1], [2]

3.9.3 Zděrování průtlačnic

K dosažení vyšší životnosti nejvíce namáhaných součástí tvářecích nástrojů – průtlačnic – se téměř vždy využívá zalisování této průtlačnice do dvou- až trojnásobné soustavy objímek. Ty zajistí kompenzační předpětí ve funkční části průtlačnice, která lépe snáší vysoká tahová namáhání vznikající od deformace materiálu při procesu tváření. Zlepší se také tuhost průtlačnice, což má příznivý vliv na rozměrovou a geometrickou přesnost protlačku. V případě poškození některé z objímek není nutné vyřadit celý nástroj, ale pouze konkrétní vadnou součást a tím výrazně ušetřit náklady na materiál nástroje.

Jednoduše zděrované průtlačnice lze použít do hodnoty vnitřních tlaků max. 1600 MPa. Pro vyšší tlaky je nezbytné vícenásobné provedení objímek. Orientačně lze rozměry průtlačnic a objímek stanovit pro jednoduchou objímku:



Obr. 3.45 Průběh napětí v jednoduché průtlačnici [2]

$$D_1 = \sqrt{D_A \cdot D_0} \quad (3.43)$$

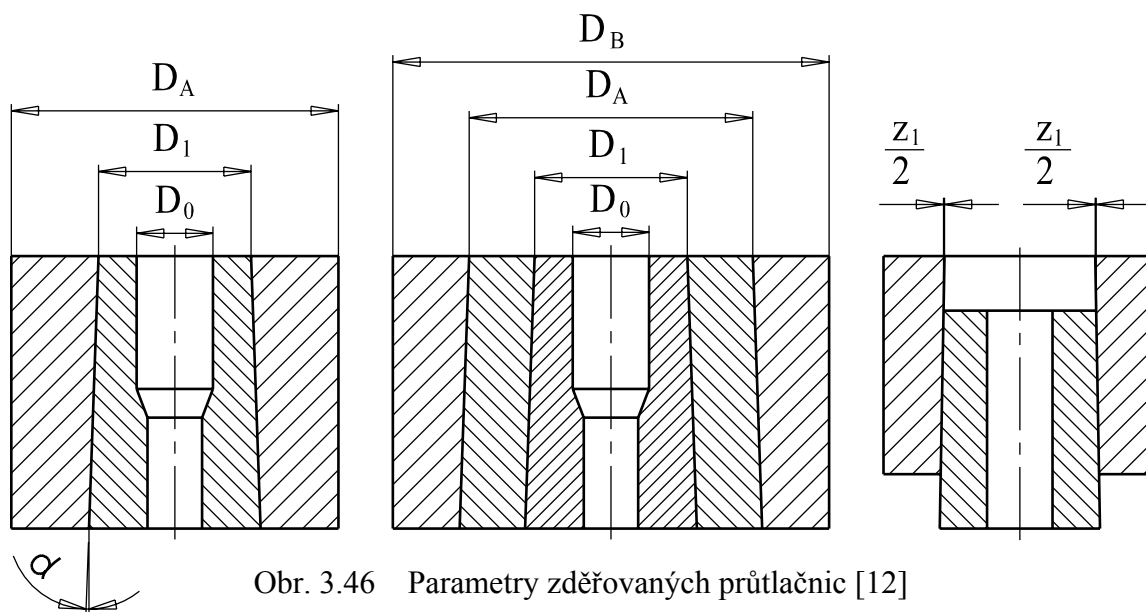
nebo

$$D_1 = 1,8 \cdot D_0, \quad D_A \doteq 1,8 \cdot D_1 \quad (3.44)$$

a pro dvojnásobně zděrovanou průtlačnici

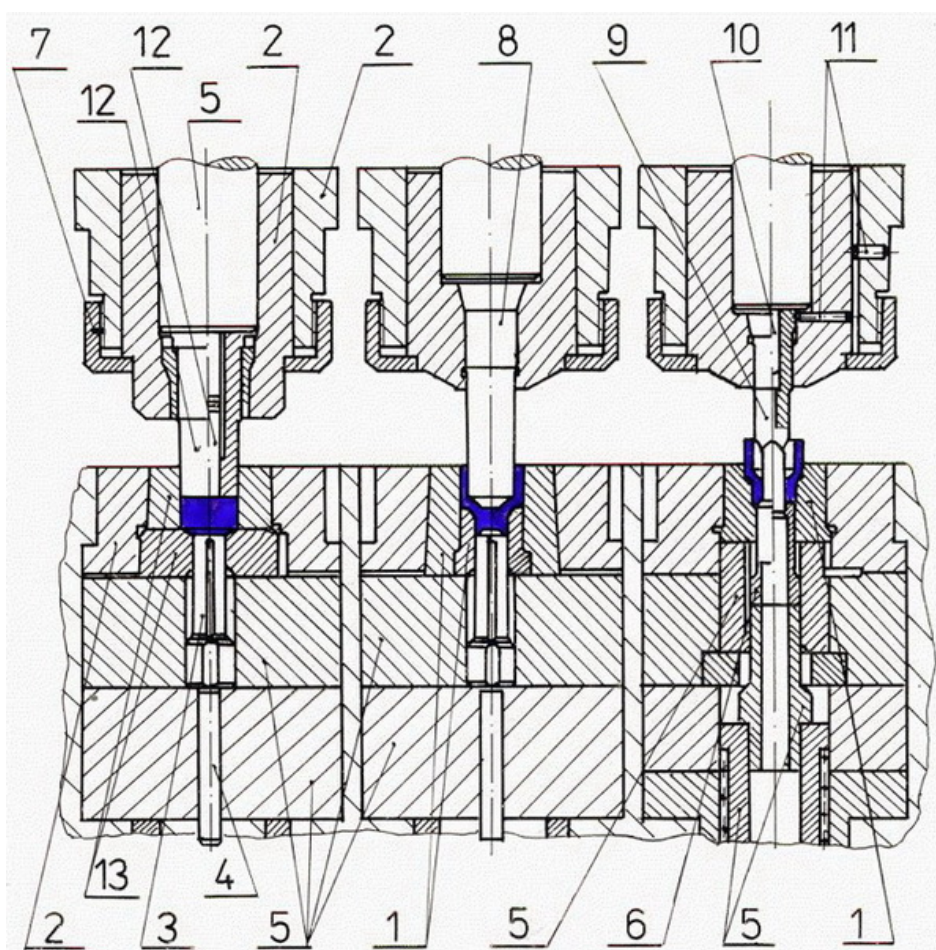
$$D_0 : D_1 : D_A : D_B = 1 : (1,6 \text{ až } 1,8) : (2,5 \text{ až } 3,2) : (4 \text{ až } 6). \quad (3.45)$$

Přesný výpočet se provádí s využitím PC s uvažováním vnitřního tlaku, materiálu nástroje a tepelného zpracování. Radiální přesah průměrů pro nalisování zděří za studena činí $z_1 = (0,005 \text{ až } 0,008) \text{ mm}$ na každý milimetr průměru. Úhel α se volí v rozmezí 1° až 3° .



Obr. 3.46 Parametry zděrovaných průtlačnic [12]

3.9.4 Příklad nástroje pro zpětné protlačování



1 – průtlačnice, 2 – objímka, 3 – vyhazovač, 4 – vyhazovací kolík, 5 – podložka, 6 – průstřižnice, 7 – upevňovací matice, 8 – průtlačník, 9 – průstřižník, 10 – vyhazovací kolík, 11 – šroub pro fixaci polohy, 12 – pěchovník, 13 – pěchovnice

Obr. 3.47 Tvářecí nástroj pro postupový tvářecí automat TPD 630 [23]

3.10 Přehled strojů pro OTS [2], [12], [21], [22]

V objemovém tváření součástí za studena lze využít následujících typů strojů:

1) mechanické lisy:

- zejména klikové a kolenové,
- vhodné pro tváření rozměrných výlisků a velké tvářecí síly,
- rychlost beranu $0,1$ až $0,6 \text{ m.s}^{-1}$,
- malé počty postupových operací (max. 2),
- lze využít mezioperační tepelné zpracování,
- doplněny o automatické podávací a přenášecí zařízení materiálu, vyhazovače atd.,
- tvářecí síla operace a její průběh musí být v souladu s pracovním diagramem lisu,
- nutná přítomnost zabezpečovacích systémů proti přetížení,
- variabilní pracovní zdvih.

2) hydraulické lisy:

- ▣ vhodné k protlačování rozměrných a především dlouhých výlisků,
- ▣ dosahují vysokých tvářecích sil působících na dlouhé pracovní dráze,
- ▣ omezení v podobě nízkého počtu zdvihů,
- ▣ pracovní rychlosti v rozmezí 0,002 až 0,1 m.s⁻¹,
- ▣ tuhá konstrukce stroje.

3) tvářecí automaty:

- ▣ pýchovací, protlačovací, dnes převážně postupové,
- ▣ automatické postupové lisy s různě uspořádanými pracovními prostory (horizontální, vertikální),
- ▣ vedle sebe několik pracovních pozic (i více než 8),
- ▣ využití zpevnění materiálu přetvořením v několika operacích – získání rovnoměrného zpevnění celého výlisku,
- ▣ vysoceproduktivní výroba, nutnost zvážit rentabilitu – maximální využití – koeficient využitelnosti automatu [2]:

$$\eta_a = \frac{Q_s}{Q_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.46)$$

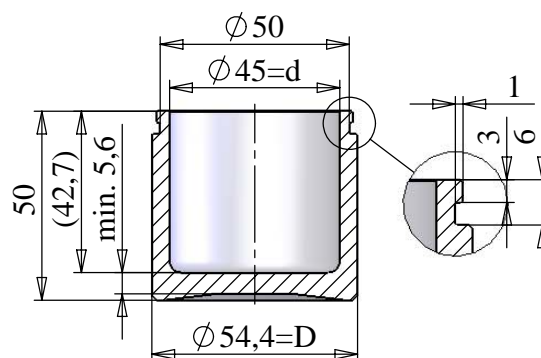
kde Q_s značí skutečně dosažený počet vyrobených součástí,
 Q_t je teoreticky dosažitelný počet vyrobených součástí [ks/hod].



Obr. 3.48 HATEBUR-COLDMATIC® AKP 3-5, pět pracovních pozic, 850 kN [22]

4. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ VÝROBY [5], [24]

Cílem každé inovace výroby nebo zcela nového výrobního technologického postupu je zejména dosažení příznivějších ekonomických výsledků a vylepšení jakosti výrobku. V přípravné fázi výroby je nutné navrhnout, porovnat a vyhodnotit všechny přípustné technologie, jimiž je možné výrobek v dostupných podmínkách zhotovit. Kritériem pro výběr té nejvhodnější metody může být jakýkoli parametr, vstupující do procesu výroby. Vhodnost dané technologie lze posuzovat například podle:



Obr. 4.1 Píst diskové brzdy
v řezu (M 1:2)

- ⇒ dostupnosti výrobních zařízení,
- ⇒ vynaložených nákladů (na nástroj, mzdy, provoz atd.),
- ⇒ spotřeby materiálu polotovaru,
- ⇒ složitosti tvaru součásti,
- ⇒ možnosti dosažení požadovaných vlastností výrobku,
- ⇒ produktivity výrobní metody (výrobní čas, počet operací, mezioperace, manipulace),
- ⇒ energetické náročnosti atp.

Výsledného tvaru součásti „píst diskové brzdy“ na obr. 4.1 lze dosáhnout s využitím mnoha metod běžně používaných ve strojírenské praxi. V této části diplomové práce jsem se rozhodl pro porovnání technologie třískového obrábění, jako současné metody, s technologiemi objemového tváření za studena (s využitím protlačování) a plošného tváření za studena (reprezentované hlubokým tažením ve více operacích). Za srovnávací kritérium jsem zvolil hledisko spotřeby materiálu polotovaru včetně nákladů na něj vynaložených. Výsledky srovnání jsou uvedeny v tabulce 4.1 a graficky interpretovány na obr. 4.2.

Tab. 4.1 Porovnání spotřeby a nákladů na materiál polotovaru součásti píst

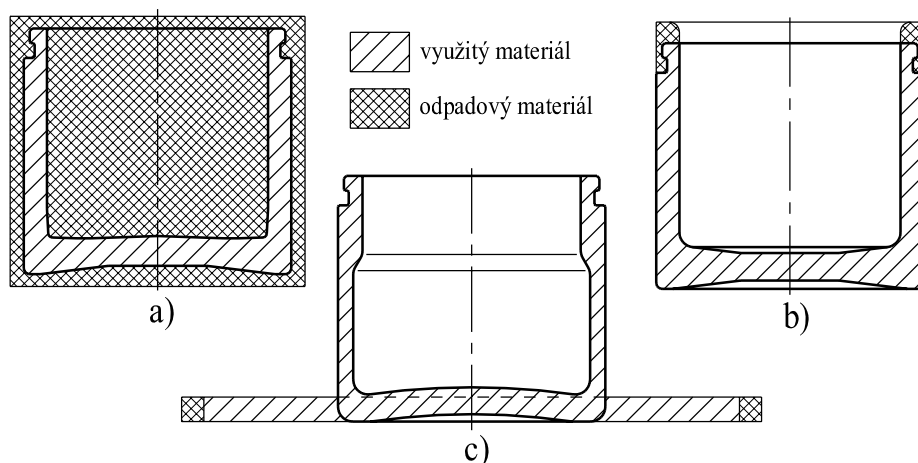
Technologie	Třískové obrábění	Protlačování	Tažení
Objem hotového pístu [cm ³]		46,338	
Hmotnost pístu [g]		362	
Rozměry polotovaru [mm]	tyč ø60 x 55	tyč ø50 x 27	plech P5 – ø118
Objem polotovaru [cm ³]	155,509	53,014	54,680
Hmotnost polotovaru [g]	1215	414	427
Odpadový materiál [cm ³]	109,171	6,676	8,342
Využití materiálu [%]	29,8	87,4	84,7
Náklady na materiál [Kč/ks]	31,08	10,60	10,92
Celkové náklady [tis. Kč/série]	9 324	3 177	3 276
Rozdíl vůči nejnižšímu [tis. Kč]	+ 6 147	-	+ 99

Pozn.: $\rho = 7,81 \frac{g}{cm^3}$; cena oceli $25,58 \frac{Kč}{kg}$; série 300 000 ks;

Po srovnání materiálových nákladů na výrobu zadané série vychází jako nejvýhodnější a nejúspornější technologie protlačování. V praxi se však nelze orientovat pouze podle jednoho sledovaného hlediska. Konečný způsob výroby tak bývá nejpříjemnějším kompromisem posuzovaných kritérií. Navíc jen málokdy lze celou součást vyrobít jediným způsobem, ale výsledného tvaru bývá docíleno vhodnou kombinací technologií. Stejně tak je tomu v případě zde řešené součásti „píst“, jejíž drážku pro pryžovou manžetu je nutno dohotovit soustružením. Dále dojde k osoustružení přilehlé čelní plochy mezikruží dle obr. 4.1, kterou tvoří přebytečný materiál polotovaru. Obráběním se ale snižuje produktivita práce a proto je snaha rozsah dokončovacích prací třískovým obráběním v OTS co nejvíce omezit.

S přihlédnutím na uvedenou úsporu materiálu a vzhledem ke zvýšení produktivity práce a jakosti součásti při použití objemového tváření za studena navrhuji zadanou součást vyrábět touto metodou. Pro doplnění je uvedena také metoda postupového tažení pístu, která však ještě není v praxi příliš rozšířena – jedná se o ruský patent z roku 2001. Nevýhodou tohoto způsobu se zdá být velký počet operací a v porovnání s protlačováním horší mechanické vlastnosti výtažku.

Obr. 4.2
Spotřeba materiálu
porovnávaných
technologií:
a) obrábění
b) protlačování
c) tažení



4.1 Technologičnost zadané součásti

Po prostudování možností technologie výroby strojních součástí objemovým tvářením za studena lze usoudit, že zadaný tvar součásti „píst diskové brzdy“ uvedené na výkrese na straně 3 je plně vyrobitelný touto technologií.

Tvar výlisku odpovídá kategorii, která je v odstavci 3.4.3 definována jako součásti kalíškovitého tvaru. Píst je tvořen pláštěm v podobě mezikruží o tloušťce stěny 4,7 mm a dnem, jehož výška má být minimálně 5,6 mm. Dno má proměnný průřez daný profilem čela průtláčnicku. Žádaného tvaru lze bez obtíží dosáhnout operací zpětného protlačování. Konkrétní geometrické a technologické parametry pro více variant této operace jsou předloženy k posouzení v kapitole 5.

Rozměry protlačku rovněž nepředstavují z hlediska vyrobitelnosti zásadní problém, pouze bude nutno zvolit tvářecí stroj s dostatečnými výkonovými parametry pro zpracování tyčového polotovaru o větším průměru (cca. 50 mm), protože standardní automaty pro práci za studena pracují s dráty do průměru jen asi 20 mm (max. 40 mm).

Zvolená ocel 12 010 spadá dle [5] do skupiny materiálů zvláště vhodných pro protlačování za studena. Tvařitelnost oceli je velmi dobrá, zásoba plasticity je také dostatečná, čemuž odpovídá hodnota ukazatele $\frac{R_{p0,2}}{R_m} \approx 0,61$. Maximální dosažitelná hodnota přetvoření pro návrh technologického postupu činí dle [16] $\varphi_{max} = 1,63$ (bez zařazení rekrytalizačního žíhání). Je však nutno dodržet výchozí stav oceli žíhané na měkko při teplotě 680 °C [25].

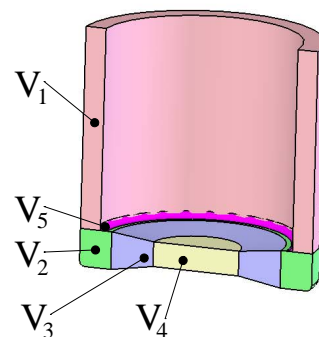
Z pohledu požadované přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu výlisku technologie OTS rovněž s rezervou tyto požadavky splňuje.

5. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ZADANÉ SOUČÁSTI

5.1 Výchozí technologické výpočty

A) Objem materiálu protlačku:

Objem protlačku lze spočítat s využitím zákona konstantního objemu během tváření a rozkladu jeho tvaru na elementární geometrická tělesa. Toto rozdělení na základní geometrická tělesa jsem provedl podle obr. 5.1. Součet elementárních objemů potom dá výsledný objem, který je potřebný ke stanovení výchozích rozměrů hutního polotovaru (drát nebo tyč). Tento postup však není zcela přesný a v případě složitějších součástí také značně neefektivní. Skutečný objem pístu jsem proto ověřil pomocí 3D modelovacího programu SolidWorks® 2007.



Obr. 5.1 Rozklad těla pístu na základní objemy

- objem polotovaru pístu:

$$V_c = \sum V_i \quad [\text{mm}^3] \quad (5.1)$$

konkrétně

$$V_c = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \quad (5.2)$$

- objem pláště pístu ①:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot h_1 = \frac{\pi \cdot (54,4^2 \text{ mm} - 45^2 \text{ mm})}{4} \cdot 45,8 \text{ mm} = 33\,610 \text{ mm}^3 \quad (5.3)$$

- objem rohového přechodu pláště do dna ②:

$$V_2 = \frac{\pi \cdot (54,4^2 \text{ mm} - 39,7^2 \text{ mm})}{4} \cdot 8,51 \text{ mm} = 9\,245 \text{ mm}^3 \quad (5.4)$$

- objem části dna ③ – mezikruží:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot (39,7^2 \text{ mm} - 20^2 \text{ mm})}{4} \cdot 6,81 \text{ mm} = 6\,290 \text{ mm}^3 \quad (5.5)$$

- objem části dna ④:

$$V_4 = \frac{\pi \cdot 20^2 \text{ mm}}{4} \cdot 5,6 \text{ mm} = 1\,759 \text{ mm}^3 \quad (5.6)$$

- zaoblení mezi pláštěm a dnem ⑤ (dle Guldinovy věty):

$$V_5 = 2\pi \cdot S_{\textcircled{5}} \cdot r_{T\textcircled{5}} = 2\pi \cdot 1,93 \text{ mm}^2 \cdot 22,18 \text{ mm} = 269 \text{ mm}^3 \quad (5.7)$$

kde $r_{T\textcircled{5}}$ je vzdálenost těžiště plochy průřezu tělesem ⑤ od osy rotace.

- potom celkový objem po dosazení do rovnice (5.2):

$$V_c = (33\,610 + 9\,245 + 6\,290 + 1\,759 + 269) \text{ mm}^3 = 51\,173 \text{ mm}^3$$

- objem pístu spočítaný programem SolidWorks:

$$V_{\text{píst}} = 51\,095 \text{ mm}^3$$

⇒ takže rozdíl výsledků obou přístupů činí 0,2 %, což lze považovat za zanedbatelný rozdíl.

B) Souhrnné informace o výpočtových parametrech procesu návrhu výroby pístu:

- průmět funkční plochy nástroje – průtlačníku:

$$S_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 45^2 \text{ mm}}{4} = 1590,4 \text{ mm}^2$$

- půdorysná plocha protlačku:

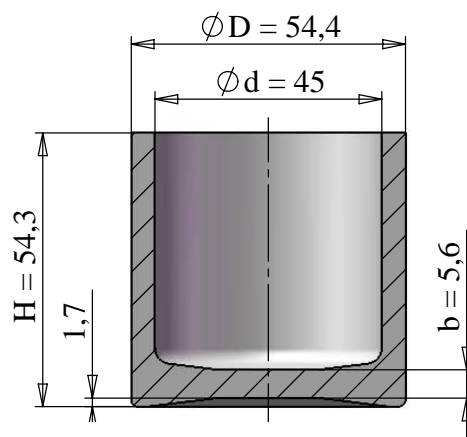
$$S_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 54,4^2 \text{ mm}}{4} = 2324,3 \text{ mm}^2$$

- hlavní logaritmické přetvoření:

$$\varphi_s = \ln \frac{S_0 - S_d}{S_0} = \ln 0,3157 \doteq -1,153$$

- poměrné přetvoření průřezu

$$\varepsilon_s = \frac{S_d}{S_0} = \frac{1590,4 \text{ mm}^2}{2324,3 \text{ mm}^2} \doteq 0,6843$$



Obr. 5.2
Geometrický model pístu

Materiálový model:

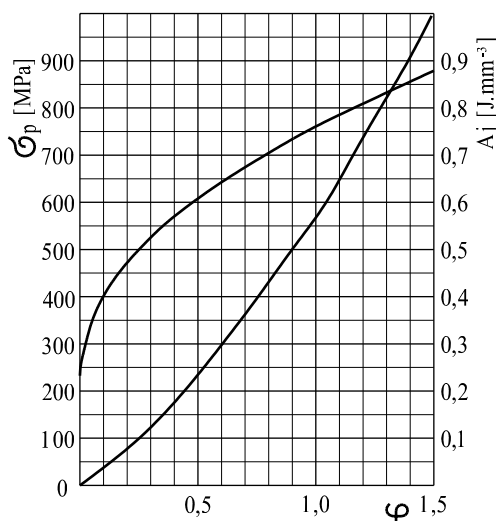
Jako materiálový model byl použit záznam pýchovací zkoušky oceli 12 010 ve stavu žíhaném na měkko, mořeném, s fosfátovaným povrchem, získané na hydraulickém lisu CZR600. Záznam je uveden v příloze 1. Součástí protokolu o zkoušce je také soubor rovnic aproximačních křivek, přičemž v následujících výpočtech je využita aproximace křivky zpevnění polynomem 5. stupně ve tvaru

$$\sigma_d = 362,87\varphi^5 - 1846,26\varphi^4 + 3650,17\varphi^3 - 3451,24\varphi^2 + 1792,11\varphi + 236,75 \quad [\text{MPa}] \quad (5.8)$$

a aproximace křivky měrné přetvárné práce má tvar polytropy

$$A_j = 0,37 \varphi^{1,4662} + 0,22 \varphi \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}]. \quad (5.9)$$

Pozn.: Rovnice (5.8) a (5.9) platí v intervalu $\varphi \in (0; 1,63)$.



Obr. 5.3 Materiálový model oceli 12 010.3 [16]

5.2 Návrh variant řešení

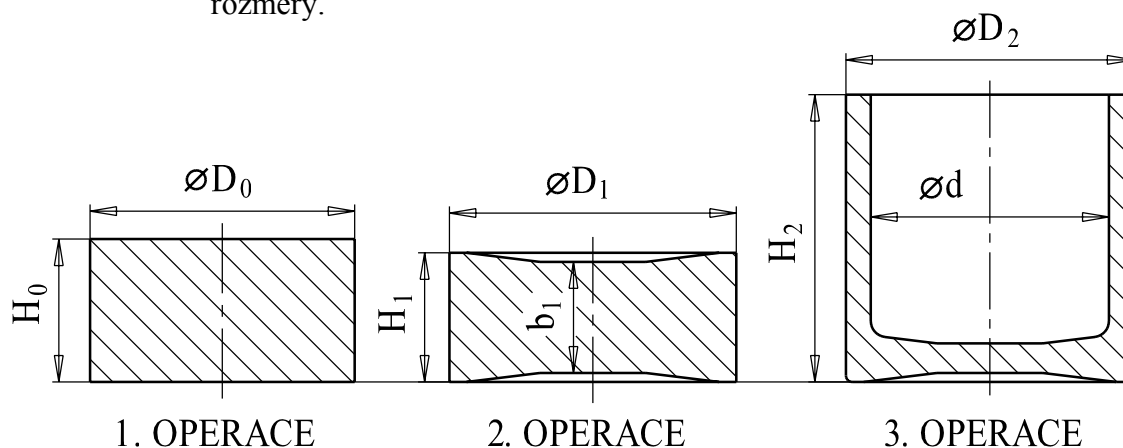
Tvar protlačovaného pístu daný výkresem na straně 3 neposkytuje mnoho variantních přístupů skladby tvářecích operací. Jedná se o jednoduchý tvar válcového kalíšku, jehož geometrické parametry, jak už bylo řečeno v kapitole 4.1, umožňují jeho zhotovení zpětným protlačením. Zvýšené pozornosti při výpočtu procesních parametrů níže uvedených výrobních postupů je však nutno věnovat oblasti dna. Kritická výška dna, při které dochází k nárůstu protlačovací síly, se podle Dippera (viz strana 37) pohybuje v oblasti hodnot $(0,3 \text{ až } 0,2) \cdot d$. Toto rozmezí u zadaného pístu představují hodnoty tloušťky dna $b \in (13,5; 9) \text{ mm}$. Vzhledem k požadované tloušťce dna kalíšku $b = 5,6 \text{ mm}$ je jasné, že budou tyto mezní hodnoty překročeny. Proto je vhodné výpočet tvářecí síly doplnit o její závislost na průběhu dráhy průtlačníku (ta je reprezentována výškou spěchování pod čelem průtlačníku).

Z důvodu výše uvedeného omezení jsem se při navrhování variant zaměřil zejména na možnosti různých způsobů protlačení dna výlisku a jeho tvarového provedení.

VARIANTA I.

První varianta postupu výroby pístu počítá se třemi dílčími operacemi (obr. 5.4):

1. operace: odštížení polotovaru z kruhové tyče o průměru $\varnothing D_0$ a délky H_0 ,
2. operace: předpěchování špalíku na výšku H_1 (popř. b_1) za účelem zarovnání čel a zhotovení zahlužení pro dosedací plochy čela průtlačníku a vyhazovače, kalibrace průměru na hodnotu $\varnothing D_1$,
3. operace: provedení zpětného protlačení pístu, kalibrace na požadované konečné rozměry.



Obr. 5.4 Sled operací postupu výroby pístu – VARIANTA I.

Rozměry polotovaru vychází ze zákona zachování objemu během tváření a byly stanoveny tak, že pokud mají tvar i rozměry polotovaru co nejvíce odpovídat konečnému protlačku, potom zvolený průměr hutního polotovaru kruhové tyče bude $\varnothing D_0 = 50 \text{ mm}$. Když je stanoven průměr polotovaru $\varnothing D_0$, není problém vypočítat jeho počáteční výšku H_0 dle vzorce

$$H_0 = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_0^2} \quad [\text{mm}] \quad (5.10)$$

a po dosazení

$$H_0 = \frac{4 \cdot 51\,173 \text{ mm}^3}{\pi \cdot 50^2 \text{ mm}} = 26,06 \text{ mm}.$$

Tento vypočtený rozměr je dále vhodné navýšit s přihlédnutím na nepřesnosti vznikající při stříhání tyčového polotovaru (např. nerovinnost ploch, otláčené hrany a otřepty atd.). Volím tedy výslednou hodnotu výšky polotovaru – špalíku $H_0 = 27 \text{ mm}$.

Další rozměrové parametry v operaci 2 & 3 byly stanoveny takto:

- $\Rightarrow \varnothing D_1 = 54,2 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow b_1 = 21 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow H_1 = 24,4 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow \varnothing D_2 = \varnothing D_{\text{koneč.}} = 54,4 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow H_2 = H_{\text{koneč.}} = 54,3 \text{ mm}$.

Z výše stanovených hodnot lze následně určit dosahovaná poměrná a hlavní logaritmická přetvoření v jednotlivých operacích:

Operace 2 – předpěchování:

$$\varepsilon_h = \frac{(27-21) \text{ mm}}{27 \text{ mm}} = 0,222,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{27 \text{ mm}}{21 \text{ mm}} = \ln 1,2857 = 0,2513,$$

$$\varepsilon_s = \left[1 - \frac{50^2 \text{ mm}}{54,2^2 \text{ mm}} \right] = 0,149,$$

$$\varphi_s = \ln \frac{54,2^2 \text{ mm}}{50^2 \text{ mm}} = \ln 1,1751 = 0,1613.$$

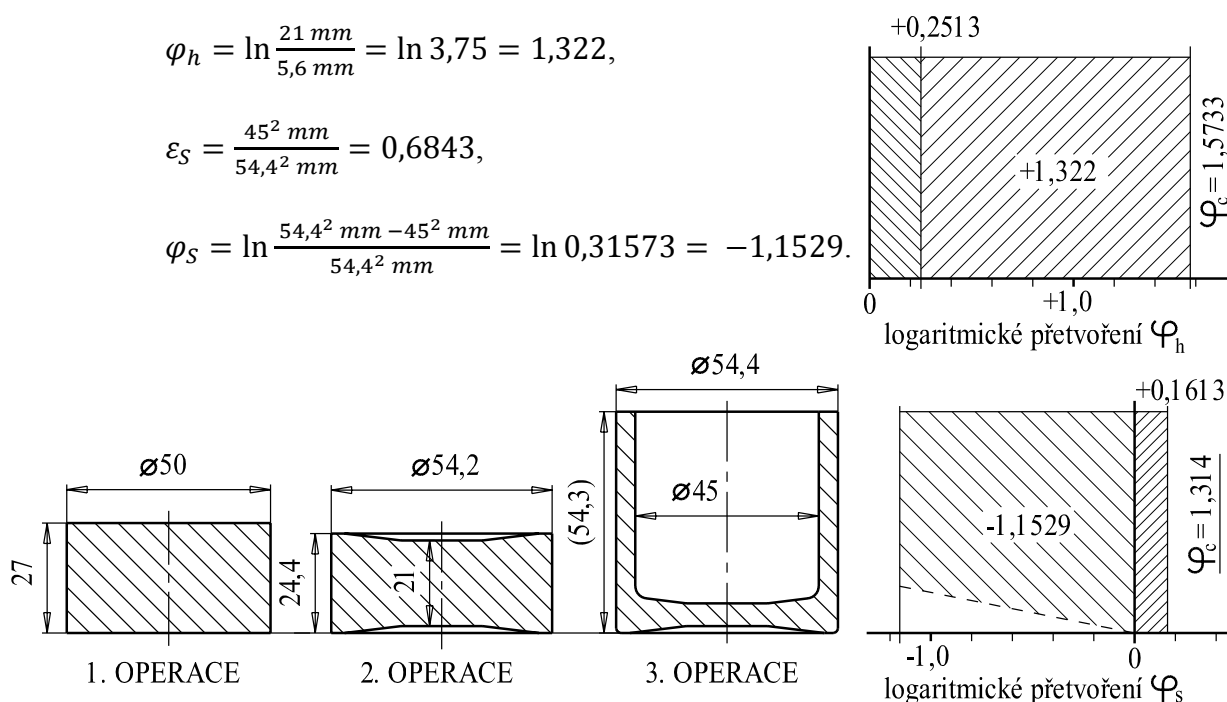
Operace 3 – zpětné protlačování:

$$\varepsilon_h = \frac{(21-5,6) \text{ mm}}{21 \text{ mm}} = 0,733,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{21 \text{ mm}}{5,6 \text{ mm}} = \ln 3,75 = 1,322,$$

$$\varepsilon_s = \frac{45^2 \text{ mm}}{54,4^2 \text{ mm}} = 0,6843,$$

$$\varphi_s = \ln \frac{54,4^2 \text{ mm} - 45^2 \text{ mm}}{54,4^2 \text{ mm}} = \ln 0,31573 = -1,1529.$$

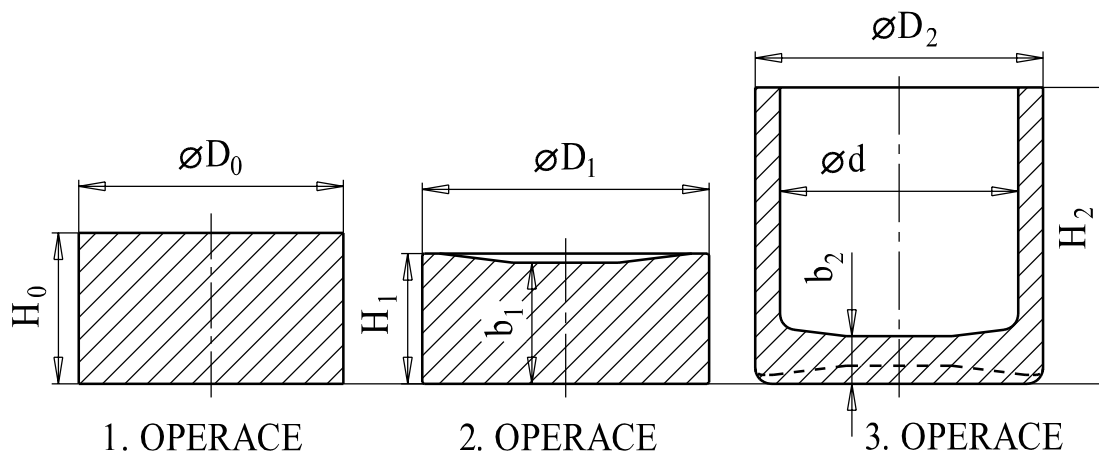


Obr. 5.5 VARIANTA I. včetně dosažených logaritmických přetvoření

VARIANTA II.

Druhá navržená varianta postupu výroby pístu odstraňuje riziko přetížení průtláčnicku vlivem nárůstu deformačního odporu po překročení kritické tloušťky dna. Snížení zatížení průtláčnicku je zajištěno ukončením operace zpětného protlačování před dosažením minimální doporučené hodnoty tloušťky dna pod čelem průtláčnicku. Dohotovení výlisku do žádaného tvaru a rozměrů se děje třískovým obráběním. S nárůstem podílu obrábění ale zároveň klesne produktivita výroby a vzroste procento odpadového materiálu.

1. operace: odstřížení polotovaru z kruhové tyče o průměru $\varnothing D_0$ a délky H_0 ,
2. operace: předpěchování špalíku na výšku H_1 (b_1) k zarovnání čel a zhotovení zahlobnutí pro dosedací plochy čela průtláčnicku, kalibrace průměru na hodnotu $\varnothing D_1$,
3. operace: zpětné protlačení výlisku na hodnotu tloušťky dna b_2 , kalibrace průměru $\varnothing D_2$ na konečnou hodnotu.



Obr. 5.6 Sled operací postupu výroby pístu – VARIANTA II.

Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, Dipper doporučuje minimální tloušťku dna pod průtláčnickem $0,2 \cdot d$, což v případě pístu činí 9 mm. Tloušťka dna po protlačení ve třetí operaci bude proto mít hodnotu $b_2 = 9 \text{ mm}$.

Průměr výchozího polotovaru kruhové tyče byl zvolen stejně jako u první varianty $\varnothing D_0 = 50 \text{ mm}$. Objem výlisku podle geometrického modelu na obr. 5.6 činí $56\,391 \text{ mm}^3$. Potom výška odstříženého špalíku v první operaci bude podle (5.10):

$$H_0 = \frac{4 \cdot 56\,391 \text{ mm}^3}{\pi \cdot 50^2 \text{ mm}} = 28,7 \text{ mm}.$$

A po zahrnutí přídavku na dělení polotovaru bude konečná výška špalíku $H_0 = 29 \text{ mm}$.

Další rozměrové parametry v operaci 2 & 3 jsou stanoveny takto:

- $\Rightarrow \varnothing D_1 = 54,2 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow b_1 = 23,5 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow H_1 = 25,2 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow \varnothing D_2 = \varnothing D_{\text{koneč.}} = 54,4 \text{ mm}$,
- $\Rightarrow H_2 = H_{\text{koneč.}} = 56 \text{ mm}$.

Dosahovaná poměrná a hlavní logaritmická přetvoření v jednotlivých operacích:

Operace 2 – předpěchování:

$$\varepsilon_h = \frac{(29-23,5) \text{ mm}}{29 \text{ mm}} = 0,19,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{29 \text{ mm}}{23,5 \text{ mm}} = \ln 1,234 = 0,21,$$

$$\varepsilon_S = \left[1 - \frac{50^2 \text{ mm}}{54,2^2 \text{ mm}} \right] = 0,149,$$

$$\varphi_S = \ln \frac{54,2^2 \text{ mm}}{50^2 \text{ mm}} = \ln 1,1751 = 0,1613.$$

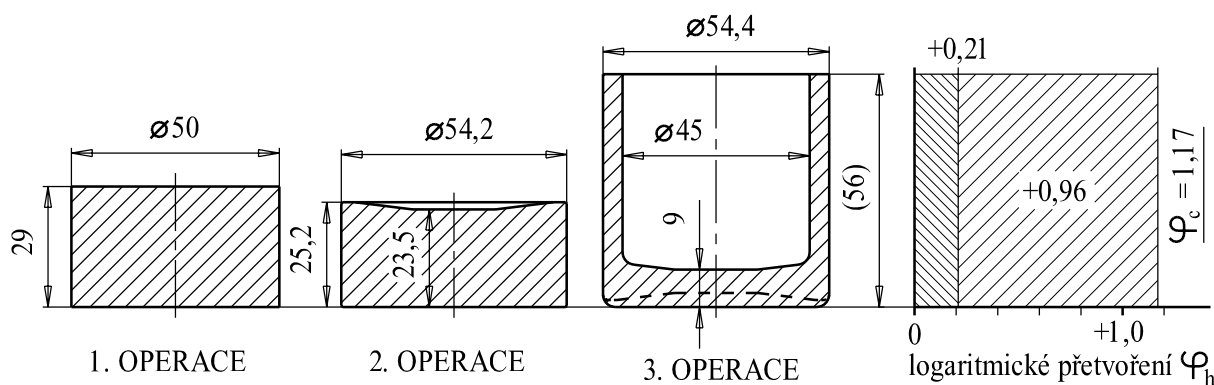
Operace 3 – zpětné protlačování:

$$\varepsilon_h = \frac{(23,5-9) \text{ mm}}{23,5 \text{ mm}} = 0,617,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{23,5 \text{ mm}}{9 \text{ mm}} = \ln 2,611 = 0,96,$$

$$\varepsilon_S = \frac{45^2 \text{ mm}}{54,4^2 \text{ mm}} = 0,6843,$$

$$\varphi_S = \ln \frac{54,4^2 \text{ mm} - 45^2 \text{ mm}}{54,4^2 \text{ mm}} = \ln 0,3157 = -1,1529.$$



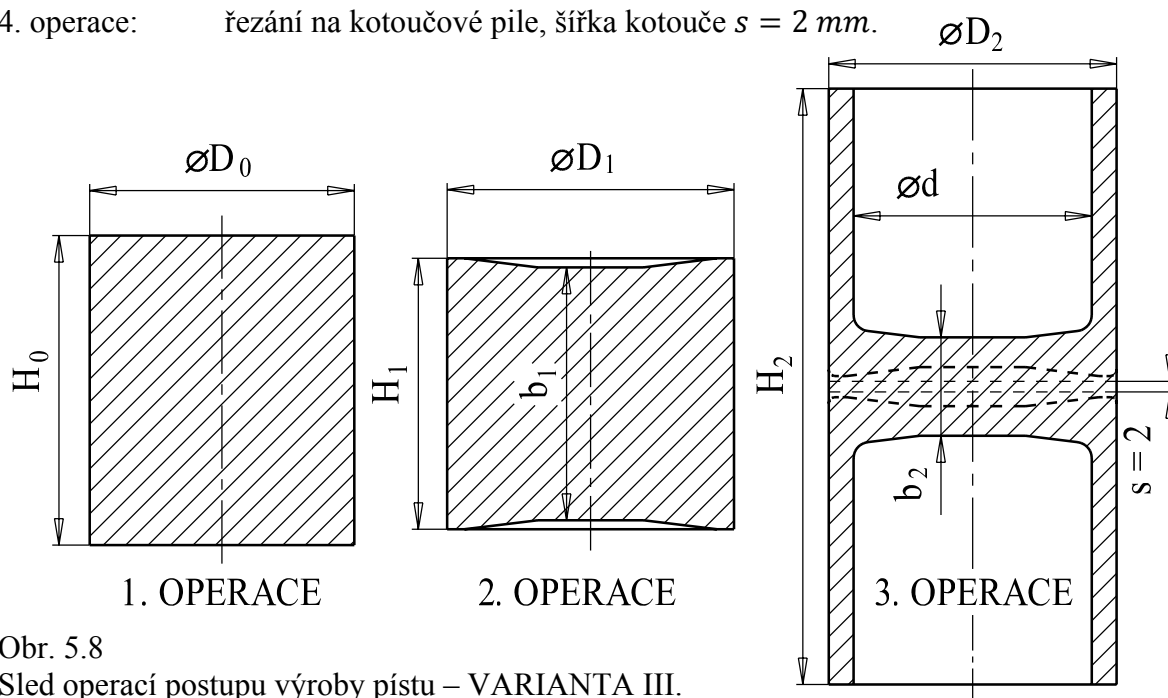
Obr. 5.7 VARIANTA II. včetně dosažených logaritmických přetvoření

VARIANTA III.

Třetí varianta je navržena tak, že při každém pracovním zdvihu stroje vypadne z nástroje zdvojený polotovár pístu vyrobený s využitím operace sdruženého (obousměrného) protlačování. Tento výlisek se následně dělí na kotoučové pile na dva samostatné polotovary, které budou dále dokončeny třískovým obráběním. Rozsah obrábění je podobný druhé navržené variantě a zahrnuje soustružení zahloubení ve vnějším dně a soustružení volně vytečeného okraje mezikruží včetně zhotovení drážky pro manžetu.

Hlavní přínos této varianty spočívá v odstranění problému s malou tloušťkou dna, jež je v tomto případě zrcadlově zdvojené a navíc doplněné o přídavek na dělení dvojitého polotovaru (odpovídá šířce pilového kotouče) a přídavek na dohotovení vnějšího dna pístu. Naopak nevýhodou je velký objem tvářeného materiálu, vyžadující použití stroje schopného vyvinout vysoké tvářecí síly. Mezi nevýhody lze zařadit také komplikovanější nástroj a zvýšení počtu výrobních operací.

1. operace: odstřižení polotovaru z kruhové tyče o průměru $\varnothing D_0$ a délky H_0 ,
2. operace: předpěchování špalíku na výšku H_1 (b_1) k zarovnání čel a zhotovení zahloubení pro dosedací plochy čela průtláčnicku a protlačovacího trnu, kalibrace průměru na hodnotu $\varnothing D_1$,
3. operace: provedení obousměrného protlačování (konvenčním zpětným průtláčnickem a trnem upevněným na vyhazovači) do tvaru uvedeného na obr. 5.8, kalibrace rozměrů b_2 , $\varnothing D_2$,
4. operace: řezání na kotoučové pile, šířka kotouče $s = 2\text{ mm}$.



Obr. 5.8

Sled operací postupu výroby pístu – VARIANTA III.

Rozměry výchozího špalíku byly stanoveny z konečného objemu dvojitého výlisku, který byl určen součtem dvojnásobku původního objemu protlačku z první varianty, přídavku na dělení výlisku daném šířkou pilového kotouče (2 mm) a přídavku na obrobení vnějšího dna pístu (cca 1 mm). Celkový objem tohoto protlačku činí $V = 114\,821\text{ mm}^3$.

Potom, vychází-li se z polotovaru kruhové tyče $\varnothing 50 \text{ mm}$, lze vypočítat výšku špalíku takto:

$$H_0 = \frac{4 \cdot 114\,821 \text{ mm}^3}{\pi \cdot 50^2 \text{ mm}} \doteq 58,5 \text{ mm}$$

S přídavkem zohledňujícím nepřesnost dělení tyče stříháním činí konečná výška špalíku $H_0 = 59 \text{ mm}$. Další geometrické parametry protlačku byly stanoveny takto:

- $\Rightarrow \varnothing D_1 = 54,2 \text{ mm},$
- $\Rightarrow b_1 = 47,8 \text{ mm},$
- $\Rightarrow H_1 \doteq 51,2 \text{ mm},$
- $\Rightarrow b_2 = 18,6 \text{ mm},$
- $\Rightarrow \varnothing D_2 = \varnothing D_{\text{koneč.}} = 54,4 \text{ mm},$
- $\Rightarrow H_2 = H_{\text{koneč.}} = 112,6 \text{ mm}.$

Dosažená poměrná a logaritmická přetvoření průřezu jsou stejná jako u předešlých variant, liší se pouze přetvoření výšky:

Operace 2 – předpěchování:

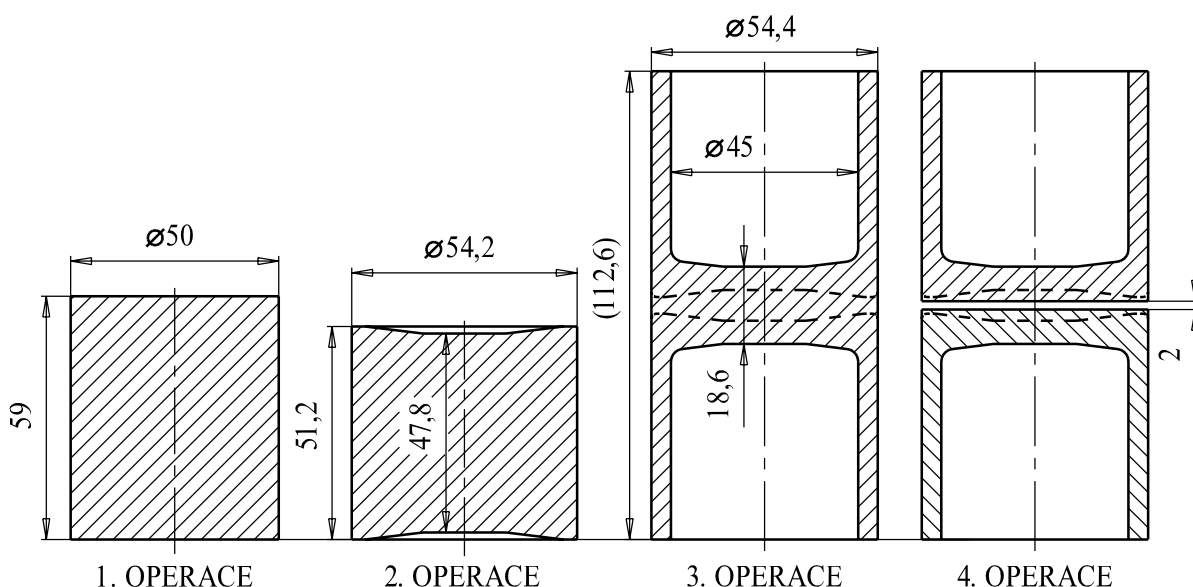
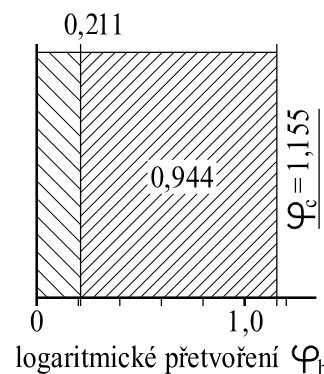
$$\varepsilon_h = \frac{(59 - 47,8) \text{ mm}}{59 \text{ mm}} = 0,19,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{59 \text{ mm}}{47,8 \text{ mm}} = \ln 1,234 = 0,211,$$

Operace 3 – zpětné protlačování:

$$\varepsilon_h = \frac{(47,8 - 18,6) \text{ mm}}{21 \text{ mm}} = 0,611,$$

$$\varphi_h = \ln \frac{47,8 \text{ mm}}{18,6 \text{ mm}} = \ln 2,57 = 0,944.$$



Obr. 5.9 VARIANTA III. včetně dosažených logaritmických přetvoření

5.3 Zhodnocení návrhů a výběr nejvhodnější varianty

V kapitole 5.2 byly navrženy tři varianty možného řešení pracovního postupu při výrobě polotovaru pístu zpětným protlačováním. Tyto varianty je potřeba porovnat a vyhodnotit podle vybraných technologicko-ekonomických hledisek.

Ze srovnání variant z hlediska pracnosti a počtu potřebných operací vychází nejlépe varianta I. Polotovar pístu je při ní vylisován během dvou tvářecích operací, a navíc vykazuje nejnižší podíl dokončovacích operací třískovým obráběním. Dále lze variantu I. považovat za nejvýhodnější z hlediska spotřeby materiálu polotovaru, jak ukazuje srovnání v tabulce 5.1. Výrobní časy a produktivita jednotlivých variant rovněž souvisí s objemem dokončovacích prací obráběním. Z tohoto pohledu je zajímavá varianta III., která sice počítá s dělením polotovaru a relativně velkým podílem dokončovacího obrábění, zároveň jsou ale při každém pracovním zdvihu stroje vyrobeny vlastně dva výlisky. Dosažená logaritmická přetvoření průřezu jsou ve všech případech stejná (výchozí polotovar má vždy stejný průměr), liší se pouze přetvoření výšková v zóně pod čelem průtlačníků. Získané mechanické vlastnosti výlisků ze všech tří variant jsou tedy přibližně stejné a pro daný účel použití dostačující. Při volbě výrobního postupu je nutné přihlédnout také ke složitosti nástroje. Cílem je dosáhnout co nejnižšího zatížení jeho funkčních částí během výrobního procesu. To vede k navrhování jednoduchých nástrojů, u kterých lze předpokládat vyšší životnost. Použití jednoduchých nástrojů dovolují varianty I. a II., přičemž u varianty II. je zatížení nástrojů nejmenší (viz tab. 5.2, hodnoty deformačních odporů σ_d). U varianty III. by mohl nastat problém se stíráním výlisku ze spodního protlačovacího trnu. Potřebná tvářecí síla (tab. 5.2) je pro varianty I. a II. srovnatelná, zvýšené síly je třeba vynaložit u III. varianty. Nicméně, všechny navržené protlačky by bylo možno vyrobit na tvářecím stroji se stejným výkonem.

Po porovnání všech navržených variant podle výše uvedených hledisek jsem se rozhodl vybrat a dále pracovat s variantou I. protože:

- ✓ polotovar pístu je zhotoven už během dvou operací – požadovaná produktivita zajištěna,
- ✓ je u ní dosaženo nejnižšího procenta dodatečných dokončovacích prací obráběním,
- ✓ má nejnižší nároky na spotřebu materiálu a s tím související nejmenší náklady na výchozí materiál,
- ✓ umožňuje použití jednoduchých nástrojů.

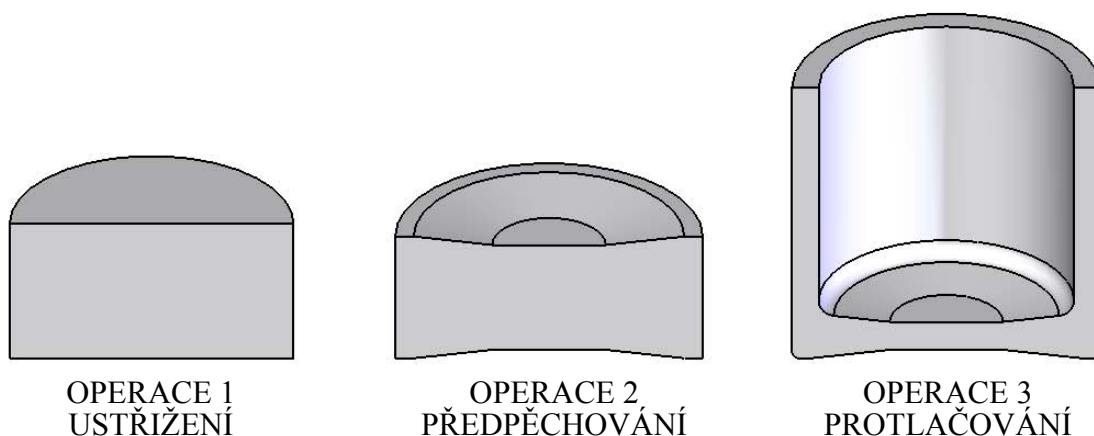
Tab. 5.1 Srovnání spotřeby materiálu navržených variant

Varianta	Objem špalíku V	Rozdíl proti nejlepšímu ΔV	Odpadový materiál $V_{odpad.}$	Procento odpadového materiálu	Hmotnost špalíku m	Rozdíl proti nejlepšímu Δm
	[mm ³ /ks]	[mm ³ /ks]	[mm ³ /ks]	[%]	[g/ks]	[g/ks]
I.	53 014	---	6 676	12,6	414	---
II.	56 941	+3 927	10 603	18,6	445	+31
III.	57 923	+4 909	11 585	20,0	452	+38

Tab. 5.2 Deformační odpory a tvářecí síly dosahované u navržených variant

Varianta	Deformační odpor σ_d	Tvářecí síla
	[MPa]	[kN]
I.	2 278	3 622
II.	2 170	3 451
III.	2 632	4 185

Pozn.: Orientační hodnoty deformačních odporů a sil byly stanoveny programem *protlac.exe* dostupným v rámci výuky na odboru technologie tváření kovů a plastů.



Obr. 5.10 Navržená varianta postupu výroby polotovaru pístu – varianta I.

5.4 Výpočet potřebné síly a práce

Pro stanovení parametrů zatěžování nástroje a tvářecího stroje během protlačování pístu zvolenou variantou jsem využil metodu výpočtu deformačního odporu dle Dippera, která jako jedna z uvedených v kapitole 3.7.2 zahrnuje zároveň vliv tloušťky stěny pláště i tloušťky dna a tím nejlépe odpovídá geometrickému modelu zadaného pístu. V závěrečné části tohoto oddílu je uvedeno srovnání vypočtených hodnot deformačního odporu pomocí dalších výpočtových vztahů uvedených v 3.7.2.

Matematický model řešení deformačního odporu dle Dippera:

Logaritmické přetvoření během protlačování po dosazení do (3.34):

$$\varphi_1 = \ln \frac{21 \text{ mm}}{5,6 \text{ mm}} = \ln 3,75 = 1,32; \varphi_c = 1,32 \cdot \left(1 + \frac{45 \text{ mm}}{8 \cdot 4,7 \text{ mm}}\right) = 2,9; \varphi_2 = 2,9 - 1,32 = 1,58$$

Z (3.35) získáme koeficient tření $f_{2(\text{stř})}$:

$$f_{2(\text{stř})} = \frac{0,06 + 0,5}{2} = 0,28$$

Potom deformační odpor $\sigma_d (\sigma_{z(\text{stř})})$ ze vztahu (3.36) má hodnotu:

$$\sigma_d = \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,06 \cdot \frac{45}{5,6}\right) \cdot 833,2 + \left(1 + \frac{2 \cdot 0,28}{54,4 - 45} \cdot 5,6\right) \cdot 983,4 = \underline{2278,6 \text{ MPa}}$$

přičemž po dosazení do (5.8) má σ_{p1} hodnotu 833,2 MPa,
 σ_{p2s} činí ze vztahu (3.37) 983,4 MPa,
hodnota $A_{j1} = 0,8463 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ byla stanovena z (5.9) a $A_{jc} \doteq 2,4 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$.

Tvářecí síla potřebná k protlačení pístu (3.25):

$$F_{\text{protl.}} = 2278,6 \text{ MPa} \cdot \frac{\pi \cdot 45^2 \text{ mm}}{4} = 3\,623\,885 \text{ N} \doteq \underline{3\,624 \text{ kN}}$$

Tvářecí práce dle (3.28):

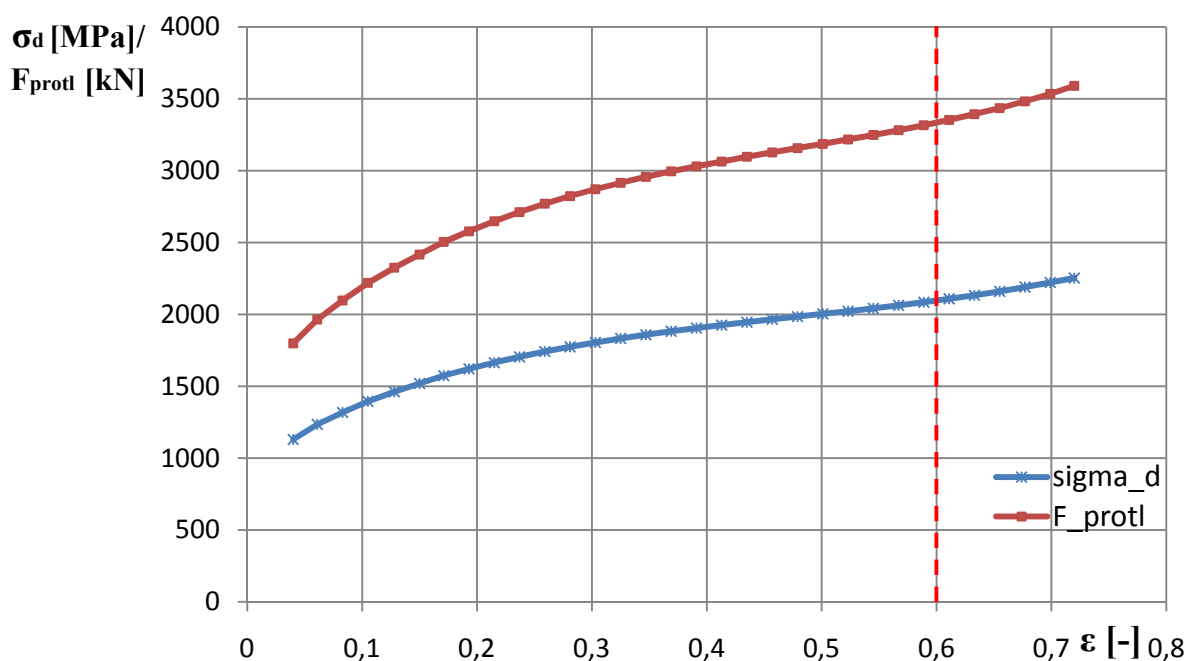
$$A_c = (219,8 + 9,05) \text{ MJ} = \underline{229 \text{ MJ}}$$

kde $A = 2278,6 \text{ MPa} \cdot 2,9 \cdot 51\,173 \text{ mm}^3 \cdot 0,65 = 219\,796\,000 \text{ J} \cong 219,8 \text{ MJ}$ podle (3.27),

$$A_p = \frac{1}{2} \cdot 3\,623\,885 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm} = 9\,059\,713 \text{ J} \cong 9,05 \text{ MJ}$$
 ze vztahu (3.29).

Tab. 5.3 Hodnoty deformačních odporů a sil při zpětném protlačování pístu dle dalších metod

Metoda výpočtu	Deformační odpor	Tvářecí síla
	[MPa]	[kN]
Dipper (3.36)	2 279	3 624
Siebel (3.32)	1 921	3 055
Sachs (3.38)	1 530	2 433
Thomsen m. kl. čar (3.39)	2 495	3 968
Thomsen m. hor. meze (3.40)	2 789	4 436
Storožev-Popov (3.41)	6 804	10 821



Obr. 5.11 Průběh deformačního odporu σ_d a síly F během operace zpětného protlačování dle Dippera

6. NÁVRH SESTAVY POSTUPOVÉHO NÁSTROJE

6.1 Návrh postupového stroje [21], [26]

Pro výrobu polotovaru součásti píst zpětným protlačováním byl zvolen tvářecí postupový automat TPD 630 od výrobce Šmeral Brno, a.s. Svým technologickým zaměřením, konstrukčním řešením i nejdůležitějšími výkonovými parametry vyhovuje požadavkům zvoleného výrobního postupu.

Tímto automatem lze vyrábět rozměrově větší součásti z polotovarů špalíků, kalot a prstenců za studena. Ve výrobním postupu součástí je možno kombinovat všechny základní způsoby tváření – pěchování, zpětné a dopředné protlačování, i prostřihování.

Konstrukční provedení automatu je založeno na svislém kolenovém lisu se svařovaným rámem. Jedná se o třípostupový stroj, se třemi svislými lisovnicemi vedle sebe. Lisovníky a lisovnice s mechanickými vyrážeci jsou uspořádány ve společném nástrojovém bloku s vodicím stojánkem. Nástrojový blok je možné seřizovat v přípravku mimo stroj. Mezioperační přenášení polotovarů je realizováno přímočarým zařízením s časově nastavitelným otevíráním a uzavíráním kleštin. Beran je pneumaticky vyvažován a je přestavitelný pomocným elektromotorem. Pohon je zajištěn hlavním elektromotorem a jeho výkon je přenášen na kolenové ústrojí.

Tab. 6.1 Nejdůležitější technické parametry automatu TPD 630

největší průměr zpracovávaného materiálu	50 mm
jmenovitá síla	6 300 kN
zdvih beranu	150 mm
počet zdvihů beranu / výlisků	40 1/min
počet lisovnic	3 -
průměr lisovnic	170 mm
rozteč lisovnic	180 mm
výkon hlavního elektromotoru	55 kW
rozměry stroje: délka x šířka x výška nad podlahou	2 500 x 2 500 x 4 100 mm
hmotnost stroje	35 tun

Pozn.: Další parametry stroje včetně schéma uspořádání uvedeny v příloze 4

6.2 Návrh postupového nástroje [12], [20]

Podkladem pro navrhování sestavy postupového nástroje i jeho jednotlivých funkčních částí byl zástavbový výkres nástrojového bloku automatu TPD 630 použitý při výrobě jiné součásti. Dále jsem vycházel ze směrnic pro konstrukci nástrojů pro práci za studena uvedených v ČSN 22 7005.

Samotný výkres sestavy (viz příloha 6) vyobrazuje spodní část nástrojového bloku pro upnutí až tří průtlačnic vedle sebe, přičemž v případě součásti píst jsou obsazeny pouze dvě pozice. Dále je zde rozkreslen horní díl nástroje, který představuje trojnásobná upínací přestavitelná hlava pro pěchovník a průtlačník. Ustřížení špalíku z polotovaru tyče se děje mimo tento nástroj. Výkres sestavy je doplněn seznamem položek, který obsahuje pouze zjednodušené údaje o jednotlivých součástech z důvodu nedostatku podrobných podkladů.

Rozměry zástavbového bloku postupového nástroje byly stanoveny odměřováním ze zmenšené předlohy a následným přepočtem naměřených rozměrů pomocí měřítka. Proto se skutečné rozměry mohou od těch uvedených na výkrese sestavy nepatrně lišit.

Rozsah zpracování dílenských výkresů součástí postupového nástroje byl vedoucím diplomové práce omezen na navržení a vyhotovení dokumentace pro průtlačnici s objímkou a průtlačník z operace čís. 3 zvolené varianty výroby.

6.2.1 Průtlačnice a objímka

Ke stanovení rozměrů průtlačnice a její objímky jsem využil podporu počítačového programu *optim97.exe* dostupného v rámci počítačové sítě odboru technologie tváření kovů a plastů. Principem programu je navržení optimálních rozměrů nástroje na základě znalosti jeho materiálových a geometrických parametrů a teplotních podmínek provozu nástroje. Tento způsob značně urychluje práci v oblasti konstrukce nástrojů pro objemové tváření za studena.

Materiál průtlačnice a objímky byl zvolen z tabulky doporučených nástrojových materiálů v příloze 2 takto:

Tab. 6.2

Průtlačnice – rychlořezná ocel ČSN 41 9830 (HS 6-5-2)									
T_{kal}	T_{pop}	HRC	E	μ	R_m	R_d	R_{p0,2}	σ_D	α
1 140	620	62	220 000	0,33	1 665	3 670	1 480	1 425	0,0000124
°C	°C	-	MPa	-	MPa	MPa	MPa	MPa	-

Tab. 6.3

Objímka – ocel ČSN 41 9733 (60WCrV8) TENAX NB									
T_{kal}	T_{pop}	HRC	E	μ	R_m	R_d	R_{p0,2}	σ_D	α
920	570	47	206 000	0,30	1 790	-	1 670	1 525	0,0000136
°C	°C	-	MPa	-	MPa	MPa	MPa	MPa	-

Vstupní parametry geometrie a teploty vyžadované programem spolu s materiálovými hodnotami danými tab. 6.2 a 6.3 byly zadány takto:

- ⇒ vnitřní poloměr průtlačnice $r_1 = 27,2 \text{ mm}$,
- ⇒ vnější poloměr objímky $r_3 = 85 \text{ mm}$,
- ⇒ teplota okolí $T_o = 23 \text{ °C}$,
- ⇒ teplota popouštěcí $T_p = 600 \text{ °C}$.

Po zadání všech nezbytných vstupních dat program v několika krocích stanovil optimální rozměry sestavy průtlačnice a objímky následovně:

- poměrný dělicí poloměr $\frac{r_2}{r_1} = 1,7321$,
- vnější poloměr průtlačnice (vnitřní poloměr objímky) $r_2 = 47,11 \text{ mm}$,
- konstrukční přesah $\delta_{rs} = 0,238 \text{ mm}$,
- maximální radiální tlak $p_1 = 1003,26 \text{ MPa}$.

Pozn.: Poměrný dělicí poloměr $\frac{r_2}{r_1}$ určený programem má relativně nízkou hodnotu. To je dáno omezenými možnostmi volby stroje, jehož zástavbový prostor pro průtlačnici (příp. objímky) má v případě TPD 630 hodnotou $r_3 = 85 \text{ mm}$.

Doplňující vypočtené hodnoty programem *optim97.exe* jsou uvedeny v protokolu viz příloha 5. Ostatní konstrukční rozměry voleny dle ČSN 22 7005. Tepelné zpracování průtlačnice a objímky viz doporučené hodnoty v tab. 6.2 a 6.3.

Pozn.: Výrobní výkresy průtlačnice a objímky viz přílohy 8 & 9.

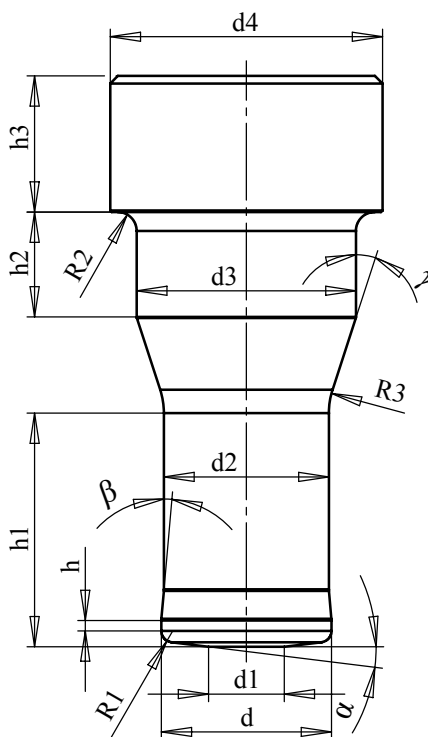
6.2.2 Průtlačník

Při konstrukčním návrhu průtlačníku jsem rozměry volil podle doporučených hodnot uvedených v ČSN 22 7005. Zvolen byl průtlačník s válcovou upínací hlavou. Rozměr h_1 byl upraven pro konkrétní pracovní zdvih stroje. Materiál a tepelné zpracování průtlačníku viz tab. 6.4.

Tab. 6.4

Průtlačník – ocel ČSN 41 9571 (X100CrMoV5-1)		
T_{kal}	T_{pop}	HRC
920 - 970	200	62
°C	°C	-

$d = 45 \text{ mm}$
 $d_1 = 20 \text{ mm}$
 $d_2 = 44,8 \text{ mm}$
 $d_3 = 56 \text{ mm}$
 $d_4 = 72 \text{ mm}$
 $h_1 = 65 \text{ mm}$
 $h_2 = 28 \text{ mm}$
 $h_3 = 36 \text{ mm}$
 $h = 2,5 \text{ mm}$
 $\alpha = 7^\circ$
 $\beta = 5^\circ$
 $\gamma = 25^\circ$
 $R_1 = 3 \text{ mm}$
 $R_2 = 5 \text{ mm}$
 $R_3 = 40 \text{ mm}$



Drsnost povrchu $R_a = 0,4$, drsnost povrchu funkční části $R_a = 0,1$.

Obr. 6.1 Určení rozměrů průtlačníku pro zpětné protlačování dle ČSN 22 7005

Pozn.: Výrobní výkres průtlačníku viz příloha 7.

7. VÝPOČTOVÁ SIMULACE POMOCÍ PROGRAMU FORMFEM

Pro zvolený postup výroby pístu byla provedena počítačová simulace závěrečné operace zpětného protlačení pístu z předpěchovaného polotovaru (viz obr. 5.4).

Účelem této simulace bylo sledování a ověření vybraných parametrů v průběhu procesu zpětného protlačování. Níže uvedené výsledky simulace nepovažuji za směrodatné z důvodu odlišných procesních podmínek teoretického výpočtu a skutečné praxe, mají čistě informativní charakter a pouze doplňují výsledky získané konvenčními výpočty anebo ty veličiny, které nelze jiným způsobem sledovat (např. zaplnění dutiny nástroje, tok kovu).

Simulace byla provedena v počítačové učebně odboru technologie tváření kovů a plastů při FSI VUT Brno s podporou 2D simulačního software FormFEM 1.6, který k práci využívá výpočtovou metodu konečných prvků a pracuje v režimu řezů rotačně symetrických těles.

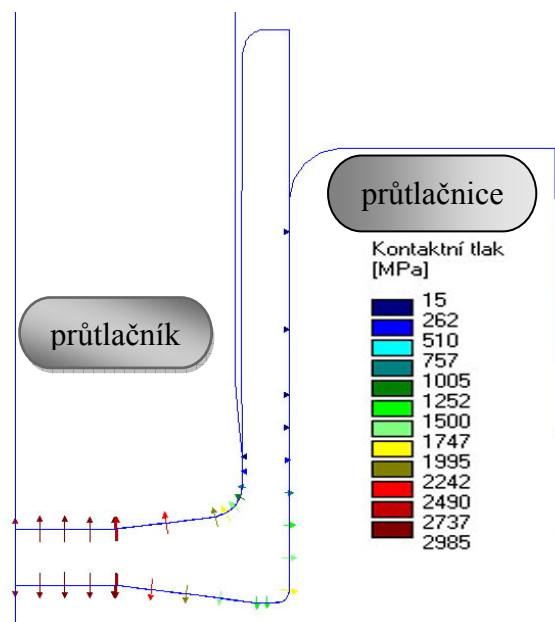
Tab. 7.1 Parametry vstupující do simulace

rozměry polotovaru	ø50 – 27 mm
materiál polotovaru	12 010.3
tvářecí teplota výchozí	23 °C
nosná vrstva pro mazivo	zinkový fosfát
mazivo	ekologické pro práci za studena, protlačování
tvářecí stroj	lis Hatebur

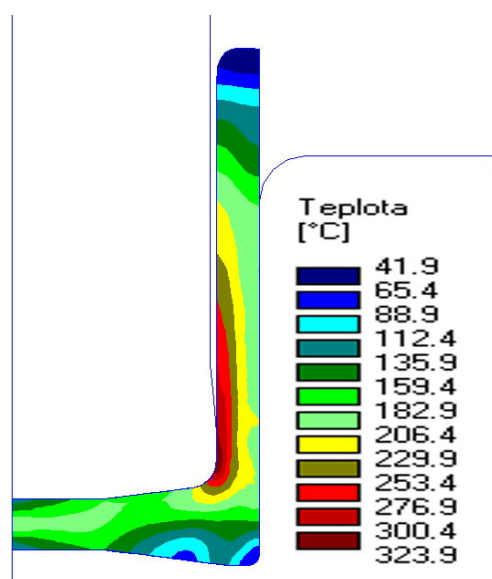
Pozn.: tribologické podmínky a tvářecí stoj voleny z dostupné databáze programu FormFEM

Geometrie nástroje a polotovaru byla zadána v grafickém formátu DXF formou výkresů pravých polovin průtláčnice (vcelku s vyhazovačem), průtláčníku a polotovaru.

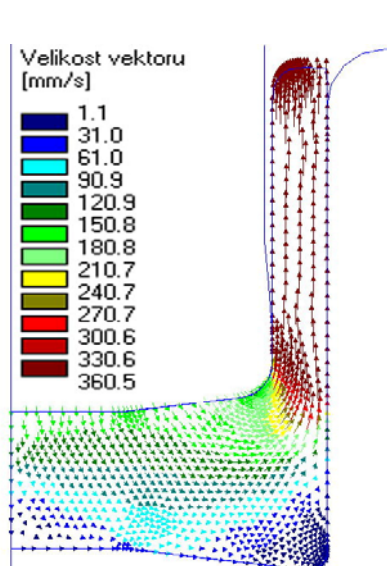
Grafické výstupy simulace FormFEMu byly pořízeny v několika fázích zpracování výpočtu. Na následujících obrázcích jsou uvedeny vybrané nejdůležitější sledované parametry včetně fáze jejich pořízení:



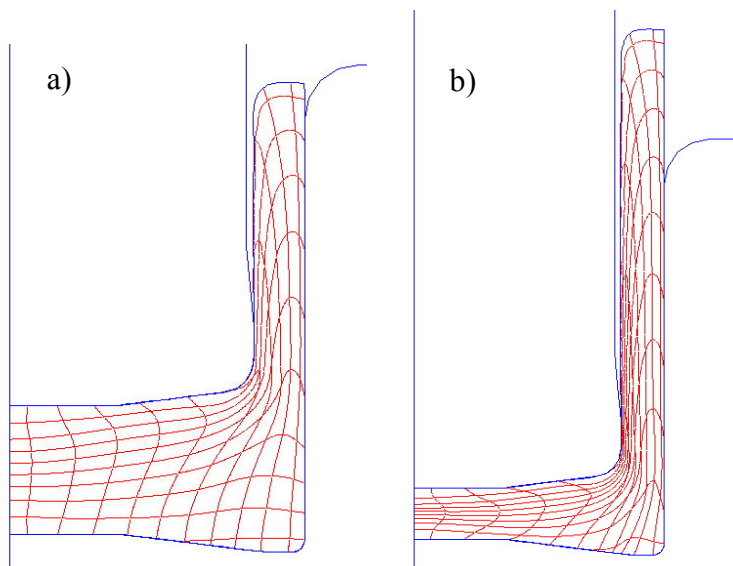
Obr. 7.1 Kontaktní tlak mezi funkčními plochami nástroje v konečné fázi simulace



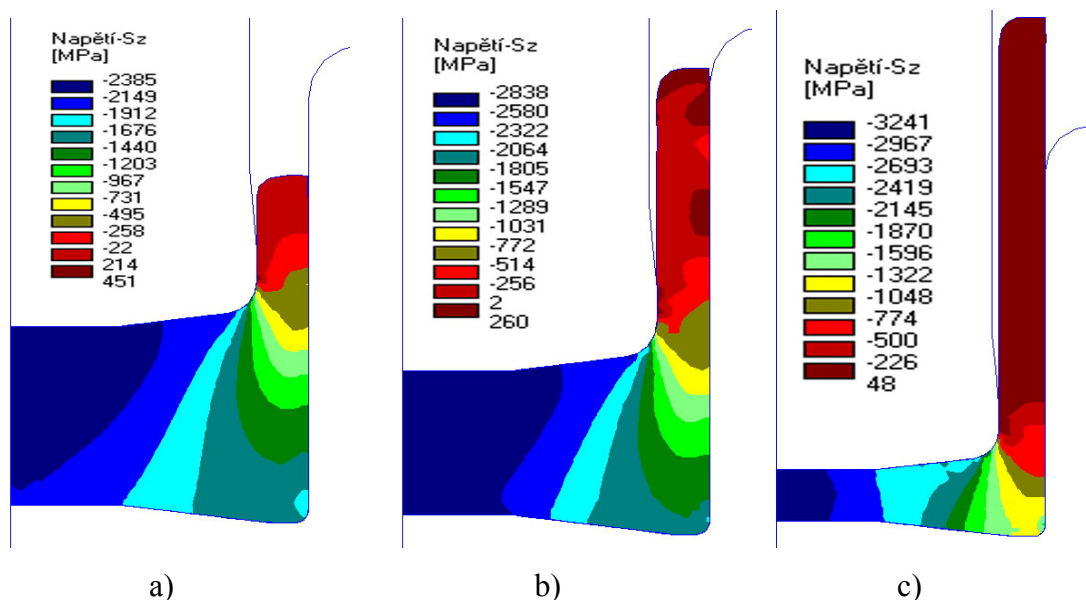
Obr. 7.2 Teploty v polotovaru dosažené na konci operace protlačování



Obr. 7.3 Vektory rychlosti toku materiálu, 55 % průběhu



Obr. 7.4 Deformační síť polotovaru v procesu protlačování:
a) 55 %, b) 100 % průběhu



Obr. 7.5 Rozložení napětí σ_z v procesu protlačování:
a) 30 %, b) 55 %, c) 100 % průběhu

Předpoklady a poznatky ze simulace:

- ✓ z grafických výstupů simulace vyplývá, že dutina v průtláčnici by měla být bezezbytku zaplněna kovem,
- ✓ i přes charakter práce za studena se teplota výlisku v okamžiku po dokončení operace protlačování pohybuje kolem 160 °C, lokálně až 300 °C,
- ✓ vysoce zatěžované nástroje, zejména dno průtláčnice a čelo průtláčnicku včetně fazetky,
- ✓ operace zpětného protlačování provedena během časového úseku 120 ms.

Pozn.: Simulace proběhla v režimu nedeformovatelných nástrojů kvůli snížení HW nároků, proto se některé výsledky simulace mohou od skutečnosti značně lišit.

8. TECHNICKÉ A EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

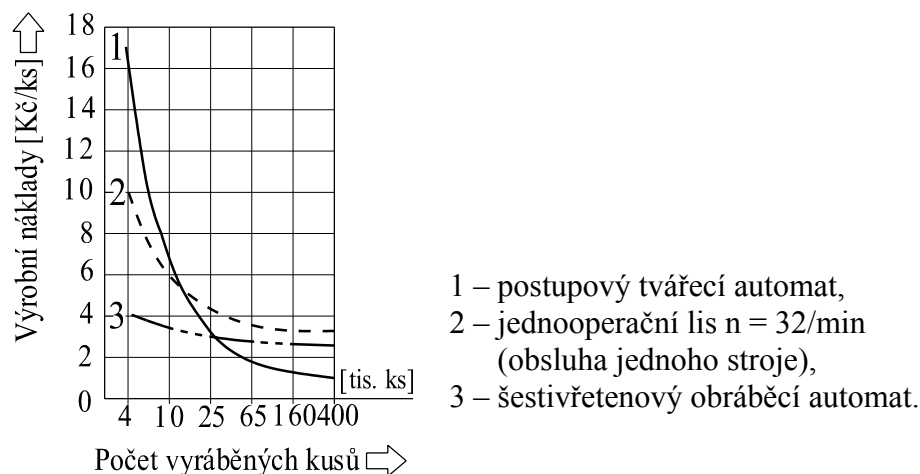
8.1 Technické hodnocení navrženého postupu

Technickým přínosem navrženého postupu výroby pístu objemovým tvářením za studena je ve srovnání s původní technologií třískového obrábění bezesporu zvýšení produktivity práce a zejména významné vylepšení mechanických vlastností a celkové jakosti konečného výrobku. Použitím tvářecího automatu bude dosaženo značně vyššího hodinového výkonu než na obráběcích automatech, kde by se nižší výrobnost musela kompenzovat větším počtem strojních jednotek. S tím zároveň souvisí vyšší provozní a mzdové náklady. Proto je použití objemového tvářením nejvíce opodstatněné ve velkosériové a hromadné výrobě, čímž je zaručena rentabilita vynaložených nákladů na drahé nástroje, jejichž cena tvoří podstatnou část vstupních nákladů. Plánovaná roční výrobní dávka součásti „píst“ je 300 000 kusů, podmínka sériovosti výroby je tedy zajištěna. Další výhodou navržené varianty je její jednoduchost, výlisek je zhotoven dvěma tvářecími operacemi.

U objemového tvářením rovněž odpadají materiálové ztráty způsobené vznikem třísek a náklady na následné skladování kovového odpadu. Koeficient využití materiálu se u objemového tvářením za studena blíží 1.

8.2 Ekonomický přínos [27], [28]

Jak už bylo v předchozí části uvedeno, ekonomičnost výroby strojních součástí záleží především na zvolené technologii a počtu vyráběných kusů. Na obr. 8.1 je taková závislost názorně vykreslena:



Obr. 8.1 Závislost výrobních nákladů na vyráběném počtu kusů pro různé stroje a technologie (pro referenční jednoduchou rotační součást) [23]

Z obr. 8.1 vyplývá, že investice do zařízení pro objemové tvářením jednoduché rotační součásti se vyplatí už po dosažení počtu 30 000 vyráběných kusů. S rostoucím počtem kusů se nákladnost výroby v porovnání s obráběním nadále snižuje.

Naopak výroba obráběním vykazuje rovnoměrnější rozložení nákladů pro celé spektrum vyráběného množství. Je výhodnější pro menší série, v oblasti hromadné výroby ale náklady na výrobu nemohou dosahovat tak příznivých hodnot jako u objemového tvářením. Proto je z ekonomického hlediska důležité pro každý výrobek stanovit takzvaný *rovnovážný bod*, kde se náklady rovnají výnosům – jasné určení, při jakém množství výrobků se výroba stává ekonomicky výhodnou (viz obr. 8.2).

Tab. 8.1 Skladba nákladů promítajících se do konečné ceny výrobku

1. Přímé náklady na materiál	Vlastní náklady výroby	Vlastní náklady výkonů	Úplné vlastní náklady výkonů	Výrobní cena	Prodejní cena
2. Přímé náklady na mzdy					
3. Ostatní přímé náklady, energie					
4. Výrobní režie					
5. Správní režie					
6. Odbytové náklady					
7. Zisk					
8. Obchodní a odbytové přírážky a srážky					

Pozn.: Z důvodu nedostatku všech potřebných ekonomických ukazatelů nebylo možno sestavit celkovou ekonomickou studii nákladů, byly stanoveny pouze nejdůležitější složky.

8.2.1 Přímé náklady na materiál

$$PN_{mat} = S \cdot C_M \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (8.1)$$

$$PN_{mat} = 0,414 \cdot 25,58 \cdot 300\,000$$

$$PN_{mat} = 3\,177\,036 \text{ Kč}$$

kde S je spotřeba materiálu [kg/ks],
 C_M ... cena materiálu [Kč/kg],
 n ... počet kusů vyráběné součásti za jeden rok.

8.2.2 Přímé náklady na mzdy

$$PN_{mzdy} = t \cdot M_t \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (8.2)$$

$$PN_{mzdy} = 4,2 \cdot 10^{-4} \cdot 600 \cdot 300\,000 \text{ Kč}$$

$$PN_{mzdy} = 75\,600 \text{ Kč}$$

kde t ... výrobní čas $t_A + t_B = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_B}{60 \cdot d_v} = \frac{0,025}{60} + \frac{0,0025}{60 \cdot 2000} \quad [\text{Nh}]$,
 t_{A1} ... čas výroby 1 kusu [Nmin],
 t_B ... čas přípravný na 1 kus [Nmin],
 d_v ... počet kusů ve výrobní dávce [ks],
 M_t ... hodinová mzda [Kč/h],
 n ... počet kusů vyráběné součásti za jeden rok [ks/rok].

8.2.3 Přímé náklady na energii

$$PN_{energie} = P \cdot \eta_j \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (8.3)$$

$$PN_{energie} = 55 \cdot 0,70 \cdot 0,025 \cdot 4,042 \cdot 300\,000$$

$$PN_{energie} = 1\,167\,128 \text{ Kč}$$

kde P je příkon elektromotoru stroje [kW],
 t_{AI} ... čas výroby 1 kusu [Nmin],
 η_j ... využití stroje [-],
 C_E ... cena energie [Kč/kWh],
 n ... počet kusů vyráběné součásti za jeden rok [ks/rok].

8.2.4 Celkové přímé náklady

$$PN_{celkem} = PN_{mat} + PN_{mzdy} + PN_{energie} \quad [\text{Kč}] \quad (8.4)$$

$$PN_{celkem} = 3\,177\,036 + 75\,600 + 1\,167\,128$$

$$PN_{celkem} = 4\,419\,764 \text{ Kč}$$

8.2.5 Přímé náklady na jeden výlisek

$$PN_{kus} = \frac{PN_{celkem}}{n} \quad [\text{Kč}] \quad (8.5)$$

$$PN_{kus} = \frac{4\,419\,764}{300\,000}$$

$$PN_{kus} = 14,73 \text{ Kč}$$

kde n je počet kusů vyráběné součásti za jeden rok [ks/rok].

8.2.6 Fixní náklady

Fixní náklady tvoří v tomto případě především náklady na nástroj:

$$N_f = 135\,000 \text{ Kč}$$

8.2.7 Zisk 15% na výrobě součásti za jeden rok

$$Z_v = \frac{[(PN_{kus} \cdot n) + N_f] \cdot 15}{100} \quad [\text{Kč}] \quad (8.6)$$

$$Z_v = \frac{[(14,73 \cdot 300\,000) + 135\,000] \cdot 15}{100}$$

$$Z_v = 683\,100 \text{ Kč}$$

8.2.8 Cena jednoho výlisku při zachování zisku 15%

$$c_v = \frac{(PN_{kus} \cdot n) + N_f + Z_v}{n} \quad [\text{Kč}] \quad (8.7)$$

$$c_v = \frac{(14,73 \cdot 300\,000) + 135\,000 + 683\,100}{300\,000}$$

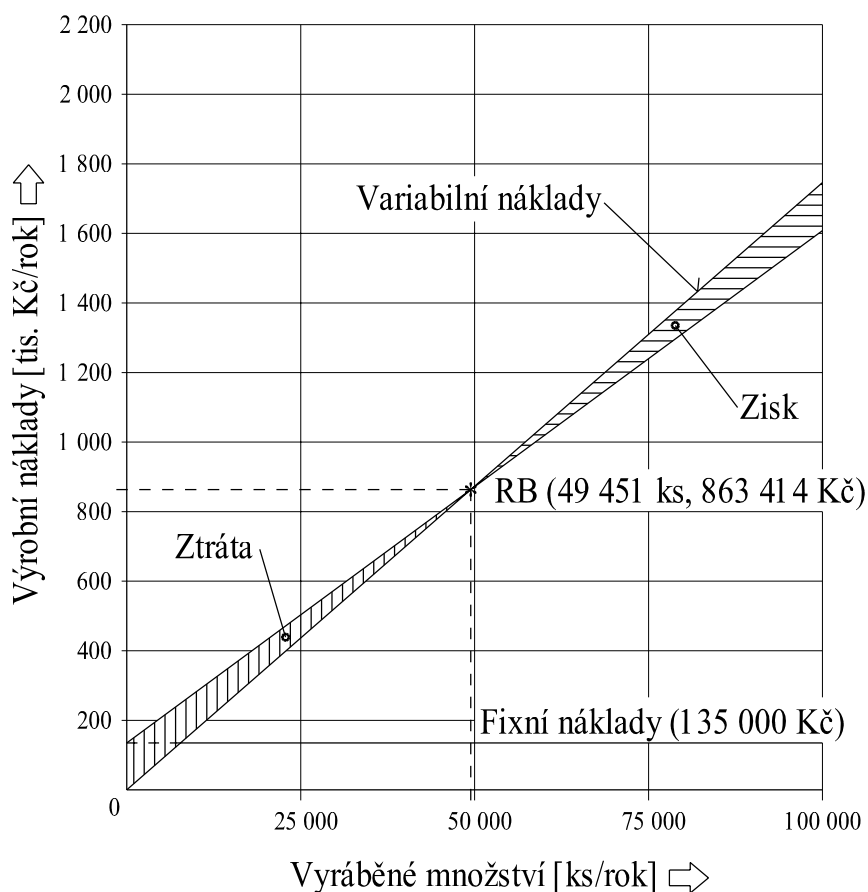
$$c_v = 17,46 \text{ Kč}$$

8.2.9 Rovnovážný bod

$$RB = \frac{N_f}{c_v - PN_{kus}} \quad [\text{ks}] \quad (8.8)$$

$$RB = \frac{135\,000}{17,46 - 14,73}$$

$$RB = 49\,451 \text{ ks}$$



Obr. 8.2 Vývoj nákladů při výrobě součásti píst objemovým tvářením za studena, stanovení rovnovážného bodu

9. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Cílem diplomové práce na téma Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením bylo navrhnout optimální technologický postup velkosériové produkce polotovaru pro výrobu strojní součásti s tvarem kalíšku s využitím kombinace základních operací objemového tváření za studena. Navržený postup měl demonstrovat hlavní přednosti zpracování ocelí objemovým tvářením za studena (OTS). Diplomová práce je tematicky rozdělena do dvou částí. V teoretické jsou definovány požadavky na vlastnosti součásti ovlivňující její funkci a kvalitu, a také zde byla zpracována literární studie dané problematiky. Technologická část se věnuje vlastnímu návrhu postupu výroby polotovaru pístu.

V úvodu technologické části bylo provedeno srovnání původně využívané technologie třískového obrábění s navrhovanou variantou OTS, přičemž srovnávacím kritériem bylo zvoleno hledisko spotřeby materiálu a jeho ceny. Z tohoto srovnání vyplynulo, že pro konkrétní zadané rozměry a tvar polotovaru pístu je technologie OTS jasně výhodnější. To, spolu se zvýšením produktivity a po prostudování tvaru výlisku z hlediska technologičnosti, vedlo k rozhodnutí, že výroba pístu objemovým tvářením je nejvhodnější metodou.

Před samotnou fází návrhu variant výroby byly vypočteny potřebné parametry nezbytné ke stanovení optimálních rozměrů výchozího hutního polotovaru. Zároveň byl definován materiálový model zadané oceli 12 010.3 a geometrický model tvaru pístu. Z těchto charakteristik se vychází při výpočtu silových a výkonových poměrů zvolené varianty výrobního postupu.

Byly navrženy celkem tři varianty postupu zhotovení požadovaného tvaru polotovaru pístu. Ty se liší zejména tvarem a rozměry dna, kterému byla věnována zvýšená pozornost z důvodu možného zvýšeného zatížení nástrojů vlivem rostoucího deformačního odporu po dosažení jeho kritické výšky. Všechny návrhy variant byly definovány slovním popisem postupu jednotlivých tvářecích operací a doplněny grafickým nákresem s uvedením hlavních rozměrových parametrů. U každé varianty jsou dále vypočteny hodnoty dosažených poměrných a logaritmických deformací a tyto následně vyneseny do příslušných grafů. Vybraná varianta měla být vhodným kompromisem vlastností, jako jsou produktivita, počet potřebných operací, úspora materiálu, rozměrová přesnost, pevnost součásti (zpevnění vlivem přetvoření), složitost nástrojů a nároky na výrobní zařízení. Po porovnání všech navržených variant podle výše uvedených kritérií byla zvolena k dalšímu zpracování varianta číslo I., která se skládá z následujících operací:

1. odstřížení polotovaru z kruhové tyče o rozměrech $\varnothing 50 \times 12 - 27$ mm,
2. předpěchování špalíku na výšku dna 21 mm za účelem zarovnání čel a zhotovení zahloubení pro dosedací plochy čela průtláčnicku a vyhazovače, kalibrace průměru polotovaru na hodnotu $\varnothing 54,2$ mm,
3. provedení zpětného protlačování, kalibrace na požadované rozměry výlisku.

Výhodou zvolené varianty je potřeba minimálního počtu tvářecích operací, tvar polotovaru pístu je zhotoven během dvou zdvihů stroje. Dále je u ní dosaženo nejnižšího procenta dodatečných dokončovacích prací třískovým obráběním a s tím souvisí také nejmenší spotřeba materiálu. Tato varianta umožňuje rovněž využití jednoduchých nástrojů. Pro vybraný technologický postup byl následně proveden výpočet tvářecích sil a deformačních odporů, jejichž hodnoty jsou nezbytné ke stanovení vhodného typu tvářecího stroje a jeho výkonových parametrů.

Výrobním zařízením byl zvolen třípostupový tvářecí automat TPD 630 od výrobce Šmeral Brno, jehož nominální hodnota tvářecí síly 6 300 kN splňuje nároky vybraného postupu (3 624 kN). Zástavbová kapacita stroje v mém případě není plně využita, obsazeny jsou pouze dvě pozice. Rozměry tvářecích nástrojů byly vyvozeny z rozměrů zástavbového prostoru zvoleného stroje, jehož rozvržení je patrné z výkresu sestavy postupového nástroje.

V rámci diplomové práce byly detailně zpracovány funkční nástroje, které se podílí na závěrečné operaci zpětného protlačování, konkrétně se jedná o průtlačník s válcovou upínací stopkou a průtlačnici vyztuženou kompenzační objímkou. K optimalizaci rozměrů průtlačnice a objímky byl využit podpůrný výukový software *optim97.exe*, ostatní rozměry nástrojů vychází z normy ČSN 22 7005 a poznatků z praxe, uvedených ve studijní literatuře (viz Seznam použité literatury). Materiál nástrojů byl zvolen následovně: průtlačník – ocel ČSN 41 9571, průtlačnice – rychlořezná ocel ČSN 41 9830 a objímka – ocel ČSN 41 9733. Tepelné zpracování nástrojů voleno dle doporučení uvedených v příslušných materiálových listech.

Provedením výpočtové simulace procesu zpětného protlačování programem FormFEM 1.6 byly ověřeny některé procesní podmínky ovlivňující průběh druhé tvářecí operace. V průběhu simulace byly sledovány veličiny jako například kontaktní tlak mezi nástrojem a polotovarem, rozložení teploty v polotovaru, zaplnění funkční dutiny nástroje nebo hodnota deformačního napětí σ_z .

V technicko-ekonomickém hodnocení byla posouzena navržená varianta výroby polotovaru pístu z hlediska výrobních nákladů a potenciálních úspor po jejím zavedení do praxe. Byly prezentovány hlavní důvody a předpoklady pro použití technologie objemového tváření ocelí za studena ve velkosériové produkci strojních součástí. Při výpočtu vlastních nákladů jsem se omezil na stanovení přímých nákladů na materiál, mzdy a energie. Ostatní náklady a režie nebylo možno zjistit z důvodu nedostatku potřebných vstupních dat. Rovnovážný bod, kdy se výroba součástí stává ekonomicky výnosná, byl v tomto případě určen hodnotou 49 451 vyrobených kusů. Pokud byla zadána požadovaná roční produkce v počtu 300 000 ks, lze jednoznačně doporučit navrženou technologii OTS pro zavedení do praxe.

Seznam použité literatury:

- [1] LANGE, Kurt, et al. *Handbook of Metal Forming*. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
- [2] BABOR, K., CVILINEK, A., FIALA, J. *Objemové tváření ocelí*. V. Hašek; 1. vyd. Praha : SNTL, 1967. 332 s. Strojírenská literatura; sv. 6006. 04-239-67.
- [3] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] ELFMARK, Jiří, et al. *Tváření kovů*. Ing. Pavel Vávra. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-03-00651-1.
- [5] KRÍŽ, Rudolf, VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka : 8. svazek - Tváření*. Praha : Scientia, spol. s r. o., 1998. 96 s. ISBN 80-7183-054-2.
- [6] KOČMAN, Karel, et al. *Aktuální příručka pro technický úsek*. Jiří Bašek. 1. vyd. Praha : Dashöfer Holding, 2001. 182 s. ISBN 80-902247-2-5.
- [7] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I.* Brno : CERM, s. r. o., 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [8] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu II.* 2. rozš. vyd. Brno : CERM, s. r. o., 2002. 397 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [9] MOTEJL, Vladimír, et al. *Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů*. 3. vyd. Brno : Littera, 2004. 610 s. ISBN 80-85763-24-9.
- [10] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 2. vyd. Brno : CERM, 2004. 168 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [11] ČSN 41 2010 *Konstrukční oceli nelegované jakostní, ušlechtilé*. VÚK. Schválena: 09.1988. Účinnost: 1988-11-01.
- [12] ČSN 22 7005 *Tvářecí nástroje*. Protlačování ocelí za studena. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet. Schválena: 05.1991. Účinnost: 1992-06-01.
- [13] JANÍČEK, L., KOPŘIVA, Z., MAROŠ, B. Chování vysoce tvárné oceli TRISTAL v podmínkách tváření za studena a poloohřevu. In *Technológia '97 : Zborník prednášok, II. diel*. Bratislava : STU, 1997. s. 810-813. ISBN 80-227-0976-X.
- [14] HOREČKA, P., JÍLEK, L., ŠIMEČEK, P. *Počítačová simulace zpětného protlačování s aktivním působením třecích sil*. In 6. Mezinárodní konference FORM 2002. Brno, 2002. s. 133.
- [15] SAMEK, R. *Perspektivy ve vývoji plošného a objemového tváření*. In 4. Mezinárodní konference FORM '98. Brno, 1998. s. 18.

- [16] BENEŠ, M., MAROŠ, B. *Křivky přetvárných odporů ocelí : 33. díl.* 1. vyd. Sv. 4. Praha: SNTL, 1986. ISBN 06-089-86. s. 228.
- [17] FELDMANN, H. D. *Protlačování oceli.* Vladimír Hašek. Praha : SNTL, 1962. 200 s.
- [18] TOMAN, Svatopluk. *Výroba čepu objemovým tvářením.* 2005. 67 s. VUT FSI Brno. Vedoucí bakalářské práce Prof. Ing. M. Forejt, CSc.
- [19] ASM International. *ASM Handbook : Metalworking: Bulk forming.* 1st edition. Vol. 14. S. L. Semiatin. Ohio, USA, 2005. ISBN 0-87170-708-X. Cold Extrusion, s. 405-418.
- [20] NOVOTNÝ, K. *Tvářecí nástroje.* VUT Brno, 1992, 184 str. ISBN 80-214-0401-9.
- [21] NOVOTNÝ, K. *Výrobní stroje, část I - tvářením,* SNTL Praha, 1983, 112 str. Reedice v r. 1986.
- [22] *Hatebur (CH): Produktový katalog tvářecích strojů* [online]. 2008 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <www.hatebur.com>.
- [23] FOREJT, M. *Závěrečný projekt – sylabus.* VUT Brno, 2002. 51 stran.
- [24] GELLER, V., ELKIN, N., BENNETT, S. *Disc brake piston embodied by drawing.* Patent č. INT WO 01/77547, Rusko, 18.10.2001.
- [25] LEINVEBER, J. et al. *Strojnické tabulky.* 2. vydání. Praha, Scientia, 1998. 914 stran. ISBN 80-7183-123-9.
- [26] HÝSEK, R. *Tvářecí stroje.* 1. vyd. Praha : SNTL, 1972. 600 s. ISBN 04-220-72.
- [27] *Ferona, a. s.: Sortimentní katalog* [online]. 2008 [cit. 2008-04-30]. Dostupný z WWW: <www.ferona.cz>.
- [28] *E.ON Produkty a ceny elektřiny* [online]. 2008 [cit. 2008-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.eon.cz/cs/customers/companies/index.shtml>>.

Seznam použitých symbolů a zkratk:

<i>symbol/zkratka</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
x, y, z	[mm]	pravoúhlé souřadnice
l, b, h, H, w	[mm]	délkové geometrické rozměry
r, R	[mm]	geometrické rozměry poloměru
d, D	[mm]	geometrické rozměry průměru
S	[mm ²]	plošný obsah
α, β	[°]	úhlový rozměr
f, μ	[-]	součinitel tření
V	[mm ³]	objem
A	[J]	práce
A_i	[J.mm ⁻³]	měrná (specifická) práce
F	[N]	síla
P	[kW]	výkon
t	[s]	čas
T	[°C]	teplota
A_{10}, A_5	[%]	tažnost materiálu
Z	[%]	kontrakce
ε	[-]	poměrné délkové přetvoření
γ	[-]	poměrné úhlové přetvoření
φ	[-]	logaritmické (skutečné) přetvoření
v	[m.s ⁻¹]	rychlost pohybu nástroje
$\dot{\varphi}$	[s ⁻¹]	rychlost deformace
σ	[MPa]	normálové napětí
σ_k	[MPa]	napětí meze kluzu
τ	[MPa]	smykové napětí
σ_d	[MPa]	deformační odpor
σ_p	[MPa]	přirozený přetvárný odpor
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
R_e	[MPa]	napětí na mezi kluzu (výrazná)
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
η	[%]	účinnost procesu
p	[MPa]	tlak
Q	[ks]	jednotkové množství
m	[g]	hmotnost

Seznam příloh:

- Příloha 1: Záznam pēchovací zkoušky oceli 12 010.3 na hydraulickém lisu CZR 600; povrch vzorku fosfátovaný, vzorek mořený, tažený, žíhaný na měkko, mořený; [16]
- Příloha 2: Výběr nástrojových materiálů pro průtlačnice a objímky [23]
- Příloha 3: Materiály k výrobě protlačovadel. Přehled slinutých karbidů používaných při výrobě průtlačnic [12]
- Příloha 4: Technické údaje lisu Šmeral TPD 630 [26]
- Příloha 5: Protokol výpočtu parametrů lisovnice a objímky (výstup programu *optim97.exe*)
- Příloha 6: Výkres sestavy postupového nástroje, č. výkresu 2008-DP-0-S
- Příloha 7: Výrobní výkres průtlačníku, č. výkresu 2008-DP-007
- Příloha 8: Výrobní výkres průtlačnice, č. výkresu 2008-DP-008
- Příloha 9: Výrobní výkres objímky, č. výkresu 2008-DP-009